

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

FELIPE TOZETTO COSTA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO BASEADO EM MODELOS E SUA
APLICAÇÃO EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

PONTA GROSSA

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

FELIPE TOZETTO COSTA

**METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO BASEADO EM MODELOS E SUA
APLICAÇÃO EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, curso de Mestrado em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como Área de Concentração: Computação para Tecnologias em Agricultura.

Orientação: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.

PONTA GROSSA

2017

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

C837 Costa, Felipe Tozetto
Metodologia de desenvolvimento baseado
em modelos e sua aplicação em máquinas
agrícolas/ Felipe Tozetto Costa. Ponta
Grossa, 2017.
95f.

Dissertação (Mestrado em Computação
Aplicada - Área de Concentração:
Computação para Tecnologias em
Agricultura), Universidade Estadual de
Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz
Stevan Jr..

1.Máquinas agrícolas. 2.ECU.
3.Metodologia de Desenvolvimento Baseado
em Modelos. 4.MBD. I.Stevan Jr., Sergio
Luiz. II. Universidade Estadual de Ponta
Grossa. Mestrado em Computação Aplicada.
III. T.

CDD: 006.3

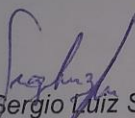
TERMO DE APROVAÇÃO

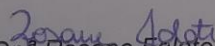
Felipe Tozetto Costa

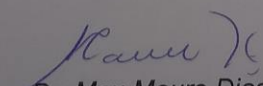
"METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO BASEADO EM MODELOS APLICADA EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS".

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Dr. Sergio Luiz Stevan Junior
UEPG


Dr.ª Rosane Balate
UEPG


Dr. Max Mauro Dias Santos
UTFPR/Ponta Grossa - PR

Ponta Grossa, 30 de junho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, criador de tudo e todos, por prover saúde para minha família para a realização dessa atividade.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr, por todo seu imprescindível conhecimento passado, tempo despendido ao projeto e principalmente por saber lidar e cobrar um acadêmico com atividades concomitantes.

A minha querida esposa Giovana e meus filhos João Miguel e Marina, por me apoiarem em todos os momentos, se superarem com a minha ausência em alguns momentos e compreenderem a importância desse projeto. Vocês são a razão de todas as minhas batalhas, o amor de vocês é fundamental para minha vida.

A minha mãe Rosangela pela constante ajuda e por ser exemplo de vida em bondade e compaixão e meu pai João Carlos (in memoriam) por ser exemplo de vida em honestidade e dedicação. Minhas irmãs Gisele e Daniele, por sempre estarem presentes em minha vida e me apoiarem constantemente.

Meu núcleo familiar pelo companheirismo e preocupação com meu bem-estar, minha Avo Leony, meus tios José, Maria e Rosa, meus sogros Valmir e Márcia, meus Padrinhos Roberto e Heraldo, minha madrinha Rose, meus cunhados Joelson, Thiago, Bruna, Rafael e meus primos.

A todos os colegas e amigos que auxiliaram nessa pesquisa. Em especial ao Prof. Luis Miguel por todo o incentivo e aulas de agronomia desde a inscrição para o mestrado até a dissertação e ao amigo Felipe Farinelli por toda a ajuda no projeto e aulas de Matlab.

Aos meus amigos por todos os momentos de descontração e incentivos.

Ao meu trabalho (FacPG) por permitir a realização do mestrado.

A esta Ies, ao programa de pós-graduação em computação aplicada, seu corpo docente, aos Professores (a) Rosane Falate, Marcelo Canteri e Petraq Papajorgji pelos conhecimentos passados, sua coordenação Prof. Alaine e demais colaboradores.

*Compaixão e tolerância não são sinais de fraqueza,
mas sim de força.*

(Tenzin Gyatso - Dalai Lama)

*Não supervalorize o que você tem, nem inveje o outro.
O invejoso não obtém paz de espírito.*

(Siddhartha Gautama - Buda)

*Guardar raiva é como segurar um carvão quente com
a intenção de jogá-lo em alguém. Quem se queima é
você.*

(Siddhartha Gautama - Buda)

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação da metodologia baseado em modelos (MBD – model-based design) para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de controle e automação para máquinas agrícolas. Baseado nos conceitos de MBD, foi proposto o desenvolvimento de uma central eletrônica embarcada para controle de funções específicas de uma plantadeira. Baseado na definição de requisitos, utilizou-se um conjunto dos principais sensores e atuadores para o desenvolvimento do modelo. Utilizou-se ferramentas como Matlab/Simulink® para o modelamento em fluxo de estados e geração de código automático o qual foi validado em software através da etapa MIL (Model-in-the-Loop). Posteriormente, realizou-se a geração automática de código através da etapa SIL (Software-in-the Loop), validando-se o firmware gerado em software; e, através da etapa PIL (Processor-in-the Loop), validou-se experimentalmente o código gerado gravando-o no microcontrolador e utilizando materiais de apoio para simulação experimentalmente dos sensores e atuadores. Posteriormente, uma vez validadas as partes do projeto e, como forma de avaliação do sistema em uma situação próxima da realidade de um plantio, desenvolveu-se uma aplicação para avaliar com dispensa controlada de sementes, inclusive avaliando uma possível obstrução de um dos orifícios do disco de dispensa. Como resultado, esta aplicação teve por objetivo propor uma ferramenta para avaliar a distância média do plantio entre sementes, velocidade média do plantio e gerar informações estatísticas a respeito da precisão da dispensa de sementes. Por fim, os resultados de validação e experimentais são apresentados, os quais permitiram concluir que a metodologia baseada em modelos pode ser aplicada também em sistemas agrícolas resultando no rápido desenvolvimento de dispositivos de eletrônica embarcada e permitindo os processos de teste e validação durante o seu desenvolvimento.

Palavras-Chave: Máquinas Agrícolas, ECU, Metodologia de Desenvolvimento Baseado em Modelos, MBD.

ABSTRACT

The present work presents the application of the model-based methodology (MBD) for the development of electronic control and automation devices for agricultural machines. Based on the concepts of MBD, it was proposed the development of an embedded electronic central to control the specific functions of a planter. Once the requirements were defined, we used a set of the main sensors and actuators for the development of the model. We used tools such as Matlab/Simulink® for stateflow modeling and automatic code generation which was tested and validated in software through MIL (Model-in-the-Loop) step. Later, the automatic generation of code was performed through the Software-in-the-Loop (SIL) step, validating the firmware generated in software; and, through the Processor-in-the-Loop (PIL) step, the generated code was validated by recording it in the microcontroller and using support materials for experimental simulation of sensors and actuators. Later, once the parts of the project were validated and, as a way of evaluating the system in a situation close to the reality of a planting, an application was developed to evaluate with a controlled dispense of seeds, including evaluating a possible obstruction of one of the holes in the dispensing disc. As a result, the objective of this application was to propose a tool to evaluate the average planting distance between seeds, average planting velocity and to generate statistical information about the accuracy of the seed dispensation. Finally, the validation and experimental results are presented, which allowed to conclude that the model-based methodology can be applied also in agricultural systems resulting in the rapid development of embedded electronics devices and allowing the processes of testing and validation during its development.

Keywords: Agricultural Machinery, ECU, Model-based Design Methodology, MBD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nível de utilização de componentes eletrônicos	21
Figura 2 - Principais elementos da comunicação por GPS de uma máquina agrícola	23
Figura 3 - Exemplificação máquina agrícola (no caso uma colhedora automotriz) com identificação dos principais sensores	26
Figura 4 - Principais funções desempenhadas por uma plantadeira	28
Figura 5 - Exemplificação dos sensores e ECUs uma plantadeira	28
Figura 6 - Exemplo do cabeamento de dados de um trator	30
Figura 7 - Exemplo do cabeamento de dados de uma plantadeira	31
Figura 8 - Ilustração de um sensor fotoelétrico de infravermelho por barreira	33
Figura 9 - Funcionamento de um sensor fotoelétrico tipo barreira	35
Figura 10 - Ilustração do funcionamento de um sensor indutivo	36
Figura 11 - Ilustração do funcionamento do sensor do levante do implemento	38
Figura 12 - Ilustração do sistema de triangulação dos satélites	39
Figura 13 - Ilustração dos elementos de uma rede ISOBUS	43
Figura 14 - Metodologia de desenvolvimento de software embarcado automotivo tradicional	47
Figura 15 - Metodologia de desenvolvimento baseado em modelos (MBD) para software embarcado automotivo	48
Figura 16 - Ilustração das fases do MBD utilizados neste trabalho	50
Figura 17 - Ilustração de tanque do graneleiro com sensor de nível	53
Figura 18 - Ilustração do disco de plantio com o sensor de vácuo	54
Figura 19 - Ilustração de um tubo de sementes com sensor	55
Figura 20 - Ilustração do funcionamento do sensor de velocidade indutivo	56
Figura 21 - Ilustração do sensor de rotação do eixo	57
Figura 22 - Ilustração de um sensor de levante do implemento	58
Figura 23 - Sensor de posicionamento global utilizado no projeto	59
Figura 24 - Ilustração da placa BeagleBone Black	62
Figura 25 - Ilustração do processo de validação do projeto	65
Figura 26 - Ilustração dos discos de sementes para a avaliação prática	66
Figura 27 - Ilustração do equipamento utilizado para a avaliação prática	67
Figura 28 - Diagrama de estados do sensor de nível	68

Figura 29 - Diagrama de estados do sensor de vácuo.....	69
Figura 30 - Diagrama de estados dos sensores de sementes	70
Figura 31 - Diagrama de estados do sensor de velocidade	71
Figura 32 - Diagrama de estados do sensor de rotação	72
Figura 33 - Diagrama de estados do sensor de levante do implemento	72
Figura 34 - Diagrama de Controle do Sensor de Posicionamento Global	73
Figura 35 - Diagrama ECU plantadeira de controle dos sensores	75
Figura 36 - Diagrama expandido de controle dos sensores da ECU	76
Figura 37 - Planta física do sistema	77
Figura 38 - Gráfico do sinal de saída do sensor de nível do tanque de graneleiro	80
Figura 39 - Gráfico do sinal de saída do sensor de vácuo	81
Figura 40 - Gráfico do sinal de saída dos sensores do tubo de sementes – ECU Simulada Software e no Microcontrolador	82
Figura 41 - Gráfico do sinal de saída do sensor de velocidade	83
Figura 42 - Gráfico do sinal de saída do sensor de rotação	84
Figura 43 - Gráfico do sinal de saída do sensor do levante	84
Figura 44 - Análise da disposição de sementes sem obstrução	85
Figura 45 - Análise da disposição de sementes com obstrução	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de tratores no Brasil de 1950 a 2015 por unidade	19
Tabela 2 - Vendas internas no mercado brasileiro no período de 1997 até 2016 por unidade	19
Tabela 3 - Patentes depositadas no período de 1998 a 2013 das fabricantes de máquinas agrícolas	20
Tabela 4 - Identificação dos principais sensores por item indicados na Figura 3	27
Tabela 5 - Identificação dos principais sensores por item indicados na Figura 5	29
Tabela 6 - Informações sobre o sinal de saída do infravermelho	53
Tabela 7 - Informações sobre o sinal de saída do sensor de vácuo	54
Tabela 8 - Informações sobre o sinal de saída do sensor de sementes	56
Tabela 9 - Informações sobre o sinal de saída do sensor de velocidade indutivo	57
Tabela 10 - Informações sobre o sinal de saída do sensor de rotação do eixo	58
Tabela 11 - Informações sobre o sinal de saída do sensor de levante do implemento	59
Tabela 12 - Descrição dos campos do cabeçalho NMEA - \$GPRMC	60
Tabela 13 - Informações técnicas sobre o sensor de posicionamento global	60
Tabela 14 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor graneleiro	69
Tabela 15 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de vácuo	69
Tabela 16 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente aos sensores do tubo de sementes	70
Tabela 17 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de velocidade	71
Tabela 18 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de rotação	72
Tabela 19 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de levante.	73
Tabela 20 - Descrição das entradas/saídas de sinais referente a ECU de controle dos sensores	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
AUTOSAR	<i>Automotive Open System Architecture</i>
BCM	<i>Body Control Module</i> (Módulo de Controle da Carroceria)
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CCM	<i>Central Control Module</i> (Módulo de Gerenciamento Central)
EBCM	<i>Electronic Brake Control Module</i> (Módulo de Controle dos Freios)
ECM	<i>Engine Control Module</i> (Módulo de Gerenciamento do Motor)
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônico)
GEM	<i>General Electronic Module</i> (Módulo Eletrônico Geral)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HIL	<i>Hardware-in-the-Loop</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISOBUS	Adaptação da norma ISO 11783
MBD	<i>Model-Based Design</i> (Modelagem Baseado em Modelos)
MIL	<i>Model-in-the-Loop</i>
PCM	<i>Powertrain Control Module</i> (Módulo de Gerenciamento do <i>Powertrain</i>)
PIB	Produto Interno Bruto
PIL	<i>Process-in-the-Loop</i>
RPM	Rotações por Minuto
SBIAGRO	Congresso Brasileiro de Agroinformática
SCM	<i>Suspension Control Module</i> (Módulo de Gerenciamento da Suspensão)
SIL	<i>Software-in-the-Loop</i>
TCU	<i>Transmission Control Unit</i> (Módulo de Gerenciamento da Transmissão)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Problema	13
1.3. Objetivos	15
1.4. Organização do Trabalho	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Máquinas Agrícolas	17
2.2. Sensores em Máquinas Agrícolas e Implementos	22
2.2.1 Identificação de Sensores em Máquinas Agrícolas	25
2.2.1.1 Colhedora Automotriz	26
2.2.1.2 Plantadeira	27
2.2.2 Tipos de Sensores	31
2.3. Eletrônica Embarcada	39
2.4. Sistemas de Comunicação: <i>Controller Area Network (CAN)</i>, <i>Local Interconnect Network (LIN)</i> e <i>FlexRay</i>	41
2.5. Metodologia de Desenvolvimento Baseado em Modelos (MBD)	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1. Materiais	52
3.1.1 Sensores	52
3.1.2 Softwares <i>Matlab/Simulink®</i> e <i>Stateflow®</i>	60
3.2. Metodologia	63
4. DESENVOLVIMENTO-ESTUDO DE CASO DA ECU DE UMA PLANTADEIRA	68
4.1 Diagrama de Blocos dos Sensores da ECU	68
4.2 Projeto de Controle de Dispensa de Sementes por MBD	74
4.3 Procedimentos para Validação	77
4.3.1 Validação dos Sensores	77
4.3.2 Função de contagem de sementes – Validação do projeto	78
5. RESULTADOS	80
5.1 Resultado da Validação dos Sensores	80
5.2 Resultado do Projeto de Monitoramento e Distribuição de Sementes	85
5.2.1 Resultado com Distribuição Automática de Sementes – Sem Obstrução	85
5.2.2 Resultado com Distribuição Automática de Sementes – Com Obstrução	86
6. CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS	89

1. INTRODUÇÃO

Historicamente no Brasil a agricultura é um dos principais alicerces da economia, desde os primórdios da colonização até os dias de hoje. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2014, o agronegócio foi responsável por 23% do total do Produto Interno Bruto (PIB), totalizando R\$ 1,1 trilhão das riquezas do país produzidas no ano de 2014. Ainda, as previsões para a produção de grãos para a safra 2016/17 devem elevar em mais de 19% em relação a safra anterior, podendo alcançar a marca histórica de mais de 220 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2017).

As máquinas agrícolas, desde seu surgimento no século XIX com a substituição da tração animal até as inovações atuais como fusão de sensores e sensores com direcionamento via satélite, buscando uma produção mais eficiente, automatizada e precisa, foram de grande importância para maximização do potencial produtivo, modificando a trajetória das técnicas de produção e trazendo ganho na oferta mundial de produtos derivados da agricultura (COSTA et al., 2015 A).

Visando as tendências atuais na busca por inovações e melhorias no potencial das máquinas agrícolas, são realizados diversos avanços na área da automação, como: sistemas de direcionamento via satélite, sensores que permitem aferir variáveis agrônômicas em campo através de sensoriamento local ou remoto, comunicação entre máquinas, fusão de sensores, e sistemas que realizam sensoriamento e atuação durante a atividade da máquina (PEETS et al., 2012).

Um ponto de convergência entre essas tecnologias é a eletrônica embarcada, ou seja, o conjunto de sistemas eletrônicos que possuem processadores (*hardware*) e programas dedicados (*software*) para aquisição, processamento, armazenamento e comunicação de dados (SOUSA et al., 2014).

Outro fator que surgiu com a utilização em grande escala de tais sistemas eletrônicos aliados ao desenvolvimento de monitores e controladores para máquinas agrícolas, foi a padronização dos sistemas de comunicação em eletrônica embarcada, que foi inicialmente viabilizada através da implantação da norma ISO 11783, conhecida no mercado também como ISOBUS (GODOY, 2007).

Segundo Sousa et al. (2014), a padronização é fundamental para viabilizar a eletrônica embarcada em máquinas agrícolas na medida em que evita a duplicação de instalação, elimina obsolescência por compatibilidade, possibilita interoperabilidade, reduz custo de manutenção e libera o agricultor de fornecedores exclusivos de sistemas comerciais. Permite a

simplificação da integração de informações com sistemas computacionais externos às máquinas, e com a padronização, as novas aplicações e desenvolvimentos são realizados seguindo a mesma linha tecnológica, alavancando estudos futuros na mesma área.

Neste cenário, técnicas de modelagem e simulação tornam-se fatores significantes dentro do processo de desenvolvimento do produto, como o desenvolvimento baseado em modelos ou MBD (*Model-Based Design*), que pode ser aplicada para reduzir o custo do projeto do sistema e até mesmo o tempo do *Time-to-Marketing*, que é o tempo entre a análise do produto até a disponibilização para a venda. Principalmente quando aplicadas desde o início do processo de desenvolvimento (GALHARDI; PINTO, 2013).

Segundo Kelemenová et al. (2013), atualmente as indústrias estão sob constante pressão para reduzir o tempo de desenvolvimento de novos produtos. Trabalhar de forma eficiente é indispensável para o sucesso em um mundo globalizado, principalmente para empresas de alta tecnologia. Nas empresas, controles eletrônicos são uma parte vital para cada desenvolvimento do produto. O desenvolvimento baseado em modelos é uma abordagem que pode cortar custos e diminuir o tempo de um projeto, pois possibilita que se trabalhe com apenas um modelo de uma função ou com um sistema completo em um ambiente integrado de software.

1.1. Problema

A demanda da utilização de sensores e atuadores, softwares embarcados e sistemas informatizados no auxílio da agricultura crescem constantemente (PEREIRA et al., 2014). As máquinas agrícolas, que são geralmente importadas, possuem uma série de sistemas de apoio e utilização de eletrônica embarcada incorporada em seu maquinário, gerando um nível alto de complexidade para realizar manutenção e novos desenvolvimentos.

A técnica de MBD é largamente utilizada no desenvolvimento de software automotivo, com maior utilização no exterior, auxiliando no desenvolvimento de aplicações de forma rápida, confiável e com a capacidade de desenvolver algo que pode ser entendido e utilizado por todos envolvidos em um projeto, facilitando o reuso e testes.

Cita-se o grupo alemão *ETAS* que desenvolve equipamentos e aplicações de software e eletrônica embarcada para a indústria automotiva. Com a utilização do MBD em seus projetos, tiveram redução de 30% no tempo de desenvolvimento de código de linguagem de programação e 50% de redução de erros residuais (ETAS, 2014). Na indústria aérea pode-se citar a fabricante de aviões *Airbus*; com a utilização da referida metodologia no desenvolvimento dos controles do piloto automático e controle do *fly-by-wire* do avião de

modelo A340, tiveram uma redução do número de erros no projeto em torno de 20 vezes e redução no tempo de finalização do projeto (WHALEN, 2013).

Apesar de algumas áreas da indústria, como a automobilística e aérea já contarem com a aplicação da modelagem baseada em modelos em alguns de seus processos com resultados positivos, a utilização desta modelagem para desenvolvimentos em máquinas agrícolas encontra-se internacionalmente poucas referências, e no cenário nacional a utilização é pequena. Este fato se torna um fator adicional de motivação na implantação dessa metodologia para este trabalho.

1.2. Justificativa

Com a demanda mundial por alimentos em constante crescimento, novas tecnologias e facilidades desenvolvidas para máquinas agrícolas são de grande interesse e possuem considerável grau de investimento pela indústria.

A exemplo da indústria automotiva, o mercado de máquinas agrícolas é muito competitivo e apresenta constante inovação, principalmente para os desenvolvedores de software e eletrônica embarcada, que sempre estão pressionados a realizarem projetos em tempos menores (SOUSA; LOPES; INAMASU, 2014).

Como os maiores fabricantes e fornecedores de dispositivos eletrônicos programáveis têm suas sedes no exterior, muitas tecnologias aplicadas como a automotiva e a agroindustrial têm seus centros de desenvolvimento no exterior, gerando uma defasagem tecnológica em relação a países como o Brasil, inclusive de repasse tardio de tecnologia.

Nos casos em que os fabricantes de máquinas agrícolas possuem unidades no território nacional, estas unidades são, em sua maioria, apenas montadoras de maquinário, realizando desenvolvimento local discreto e focado. Ou seja, os projetos e desenvolvimentos de centrais eletrônicas, sensores e demais itens da parte eletrônica são realizados nas matrizes e, chegam prontos ao nosso país.

A metodologia de Desenvolvimento Baseado em Modelos (MBD) possui aplicações em diversos setores onde se inserem dispositivos de eletrônica embarcada. Tem-se destacado mais notoriamente em mercados como o automobilístico e aéreo, e há poucos relatos no setor da agroindústria por ser, até então, mais robusto que tecnológico.

Com o crescimento da inserção tecnológica no campo, principalmente pelo desenvolvimento de tecnologias embarcadas para agricultura de precisão focadas nas características agrícolas locais, esta metodologia pode proporcionar ganhos nos processos de customização de máquinas e ferramentas no mercado nacional, principalmente com o

desenvolvimento e inserção crescente de novas ferramentas de sensoriamento, automação e controle customizado em máquinas agrícolas.

Neste panorama, este trabalho aborda o tema do desenvolvimento baseado em modelos a nível nacional, contextualizando seu grau de utilização e seus benefícios, com foco na aplicação para funções específicas em máquinas agrícolas.

1.3. Objetivos

Estudar o estado da arte da tecnologia de máquinas agrícolas realizando a identificação dos sensores e atuadores existentes e sua expansão, e utilizar a metodologia baseada em modelos na análise de dois estudos de caso para o desenvolvimento de uma proposta de uma central eletrônica embarcada para o controle de algumas funções específicas de uma máquina agrícola.

Os objetivos específicos envolvem:

- Estudar o estado tecnológico atual em automação e eletrônica embarcada em máquinas e implementos agrícolas;
- Estudar o atual estado do uso dos sensores e sua expansão em máquinas e implementos agrícolas;
- Identificação dos sensores e atuadores em máquinas e implementos agrícolas e estabelecer as conexões elétricas e de dados entre suas unidades de controle eletrônicas;
- Definir estudo de caso para aplicação da técnica de desenvolvimento baseado em modelos (MBD);
- Estudar as fases da técnica MBD: MIL, SIL, PIL e HIL;
- Definir requisitos para um conjunto de funções específicas da máquina a ser embarcada;
- Desenvolver a modelagem destas funções (fase *Model-in-the-Loop* - MIL);
- Efetuar a simulação dos códigos gerados automaticamente pelo software, (fase *Software-in-the-Loop* - SIL);
- Realizar simulações e testes para verificação e validação dos requisitos;
- Planejar e desenvolver planta física de controle (fase *Processor-in-the-Loop* - PIL);
- Realizar a integração da planta física com a parte do software e com a planta física integrada, realizar uma avaliação prática simulando uma semeadura, avaliando como resultado informações quanto ao desempenho da quantidade de sementes depositadas por tempo, espaçamento entre sementes e demais informações estatísticas referentes ao desempenho do implemento agrícola.

1.4. Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, sendo o primeiro a introdução, descrição do problema e os objetivos deste trabalho já apresentados. No segundo capítulo segue a revisão de literatura, com a definição e explicação dos principais conceitos que envolvem este trabalho. No terceiro capítulo é discutida a metodologia, onde são detalhados os processos e como estes foram utilizados no desenvolvimento desta dissertação. No quarto capítulo consta o estudo de caso da aplicação do MBD em uma plantadeira, onde são apresentados os testes de validação de cada bloco/sensor do projeto, segundo dos resultados de um projeto aplicado ao controle de dispensação de sementes baseado em MBD. Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção estão detalhados alguns conceitos relevantes a esta pesquisa em relação a metodologias e equipamentos utilizados. Inicia-se com breve histórico da utilização de máquinas agrícolas e segue com dados da utilização atual de máquinas na agricultura. Continua com contextualização dos sensores em máquinas e implementos agrícolas e a identificação dos principais sensores utilizados em estudos de caso.

Consta ainda neste capítulo, uma breve revisão sobre a eletrônica embarcada focada nesse projeto e definição dos sistemas de comunicação *Controller Area Network* (CAN), *Local Interconnect Network* (LIN) e *FlexRay*. Esta revisão é finalizada com a explicação sobre a Metodologia Baseado em Modelos (MBD).

2.1. Máquinas Agrícolas

Até o século XVIII, o uso de ferramentas na agricultura ocorria de forma rudimentar e com baixa produtividade, fabricados com base em ferro e madeira, criados de forma artesanal. Entretanto, com o crescimento populacional vertiginoso na Europa em meados do século XIX, unido a revolução industrial e a grande demanda por alimentos, houve a necessidade do aumento da produção agrícola (DERRY; WILLIAMS, 1977).

Relata-se que os primeiros implementos utilizados na agricultura foram criados simultaneamente na Grã-Bretanha e Estados Unidos, em meados de 1780, e eram utilizados na colheita de grãos. Primeiramente foram desenvolvidos para serem utilizados por tração animal, e naturalmente tiveram um processo evolutivo considerável antes de servirem para produções em escala.

Após este período inicial da utilização de máquinas agrícolas, foram os Estados Unidos o polo de desenvolvimento no século XIX. Fatores como a visão de pessoas como George Washington e Thomas Jefferson que trouxeram defensores da invocação tecnológica para seu país, assim como a dificuldade que as máquinas importadas tinham no terreno americano, que impulsionou melhorias como a do ferreiro *John Deere*, quem desenvolveu em 1837 arados de ferro liso que funcionaram bem no terreno americano (RAMUSSEIN, 1983; COSTA et al., 2015 A).

Com o desenvolvimento de máquinas de tração animal que aravam, semeavam e cobriam em uma mesma operação, houve o início de produções em escala e consequente o encorajamento de inovações, tanto para o milho quanto para outras culturas. O momento de inovação estava em um estágio importante em função da mão de obra escassa devido ao

deslocamento populacional para as cidades ocasionado pela Revolução Industrial tanto na Europa como nos Estados Unidos (VIAN; JUNIOR, 2010).

Assim como a Revolução Industrial, a guerra civil Norte Americana impulsionou para que houvesse a troca da mão de obra humana e tração animal para equipamentos mecânicos. Nesse quesito, acabaram sendo eles os pioneiros no uso de tratores, grandes trilhadoras e colheitadeiras movidas a vapor que conseguiam uma colheita de trigo em 12 hectares com um dia de trabalho.

Em 1862, o então Presidente Norte Americano Abraham Lincoln criou a Lei Da Propriedade Rural, que determinava a transferência de terras dos estados. Essa lei, juntamente com a construção de grandes estradas de ferro, possibilitou que os agricultores, tanto os grandes quanto os pequenos, pudessem criar uma agricultura mecanizada na época. Em 1880, no estado da Dakota do Norte, já existiam alguns fazendeiros se utilizando de tratores a vapor. Essa tendência de mecanização firmou-se no final do século XIX, com as empresas de máquinas agrícolas na Europa como nos Estados Unidos, com aumento de produção (FONSECA, 1990).

No Brasil, as primeiras máquinas agrícolas foram importadas na década de 30. Todavia, pela dificuldade da importação e do alto preço, foram poucos os agricultores que conseguiram trazer implementos da Europa ou Estados Unidos para o país. Data-se que a primeira colheita mecanizada realizada no Brasil ocorreu em 1932, no estado do Rio Grande do Sul (VIAN; JUNIOR, 2010).

Logo após o término da Segunda Guerra Mundial, houve um sensível avanço na mecanização agrícola no País. Com o retorno do comércio entre os países e as facilidades do governo brasileiro com taxas cambiais e financiamentos, ocorreu um aumento relevante nas importações de equipamentos agrícolas para o Brasil.

A década de 60 foi marcada pela substituição do modelo de importações de tratores e implementos para a modernização do setor agrário nacional, fato ocorrido em conjunto com a formação do Complexo Agroindustrial Brasileiro (TEIXEIRA, 2005).

Para demonstrar o crescimento da utilização de tratores no Brasil a partir de 1950, a Tabela 1 apresenta o número de tratores entre 1950 até 2015, conforme os dados do Censo Agropecuário mais recente disponível – IBGE (2006), sendo que para os dados a partir do ano de 2006 foram somados os valores de vendas internas de tratores ao mercado brasileiro fornecidos pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2017). Estão sinalizados na tabela com o símbolo (*) os valores que foram obtidos após o

último Censo Agropecuário disponível (IBGE, 2006). Percebe-se o constante crescimento do número de tratores em uso, um indicativo de mudança nos moldes produtivos do país.

Tabela 1 – Número de tratores no Brasil de 1950 a 2015 por unidade

Anos	Número de Tratores
1950	8.372
1960	61.338
1970	165.870
1980	527.906
1985	665.280
1995	799.742
2006	820.673
2010*	993.243
2015*	1.217.118

Fonte: Adaptado de Censo Agropecuário IBGE, 2006 e ANFAVEA, 2017.

Como forma de demonstrar o crescimento da utilização de máquinas agrícolas em geral, pode-se analisar na Tabela 2 o crescimento da utilização de máquinas agrícolas nos últimos 20 anos, com base nos dados de venda unitária para o mercado brasileiro de Tratores de Rodas, Cultivadores Motorizados e Colheitadeiras de Grãos. Dados coletados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2017).

Tabela 2 – Vendas internas no mercado brasileiro no período de 1997 até 2016 por unidade

Ano	Tratores de Rodas	Cultivadores Motorizados	Colheitadeira de Grãos	Total
97-98	33.889	1.806	8.398	44.093
99-00	43.079	3.171	14.718	60.968
01-02	61.276	2.655	11.493	75.424
03-04	58.041	3.566	8.190	69.797
05-06	37.684	3.400	6.687	47.771
07-08	72.657	3.998	2.563	79.218
09-10	99.913	3.267	11.032	114.212
11-12	104.859	1.906	9.670	116.435
13-14	119.016	1.351	6.478	126.845
15-16	72.833	1.294	4.068	78.195

Fonte: Adaptado de ANFAVEA, 2017.

Utilizando o total da soma das vendas internas de máquinas agrícolas nos biênios da Tabela 2, nota-se um crescimento no número de vendas em grande parte do período total, com exceção dos períodos de 2005-2006 e 2015-2016. No período de 2005-2006 a diminuição deve-se pela crise econômica dos agronegócios, evidenciada pela perda de poder de compra

dos agricultores e contexto macroeconômico negativo (taxa de juros elevada, taxa de câmbio apreciada e gastos públicos em continuado crescimento) (FERREIRA; VEGRO, 2006).

No período 2015-2016 a redução no número de vendas comparado com o biênio que é o recorde 2013-2014 foi de 38,35%, esta diminuição deve-se ao fato da economia brasileira padecer sob forte recessão, e apesar do agronegócio ser exceção a essa recessão, a situação geral do país impactou para a diminuição elevada dos números do biênio 2015-2016, essa diminuição do número de vendas acarretaram em um menor crescimento da produção agropecuária brasileira (FREDO; SILVA; VEGRO, 2016).

O crescimento da utilização das máquinas agrícolas foi fator determinante para melhoria na produtividade e modernização em diversas etapas da lavoura. Atualmente, com a inclusão constante de eletrônica embarcada e utilização de sensores, unidades eletrônicas de controle estão se tornando indispensáveis à modernização para continuar produzindo em grande escala.

Segundo Conceição e Valero (2013), a introdução dessas tecnologias iniciou-se pela utilização de componentes assistidos eletricamente, seja a assistência elétrica dos comandos eletro-hidráulicos de um sistema de transmissão ou da tomada de força em tratores agrícolas. Posteriormente surgem os componentes assistidos e controlados por computador, os componentes controlados de forma remota e por último o desenvolvimento de máquinas completamente autônomas – robotização.

Com um mercado de fabricação de máquinas agrícolas acirrado, as empresas investem em melhorias e novas aplicações tecnológicas, que tragam maior facilidade e promovam uma maior produtividade na agricultura. Para demonstrar esse fato, pode-se analisar na Tabela 3, o número de patentes depositadas pelas principais fabricantes de máquinas agrícola, nos anos de 1998 até 2013, separadas por porcentagem de patentes para cada área: Implementos agrícolas, Mecânica dos Tratores e Eletrônica Embarcada.

Tabela 3 - Patentes depositadas no período de 1998 a 2013 das fabricantes de máquinas agrícolas

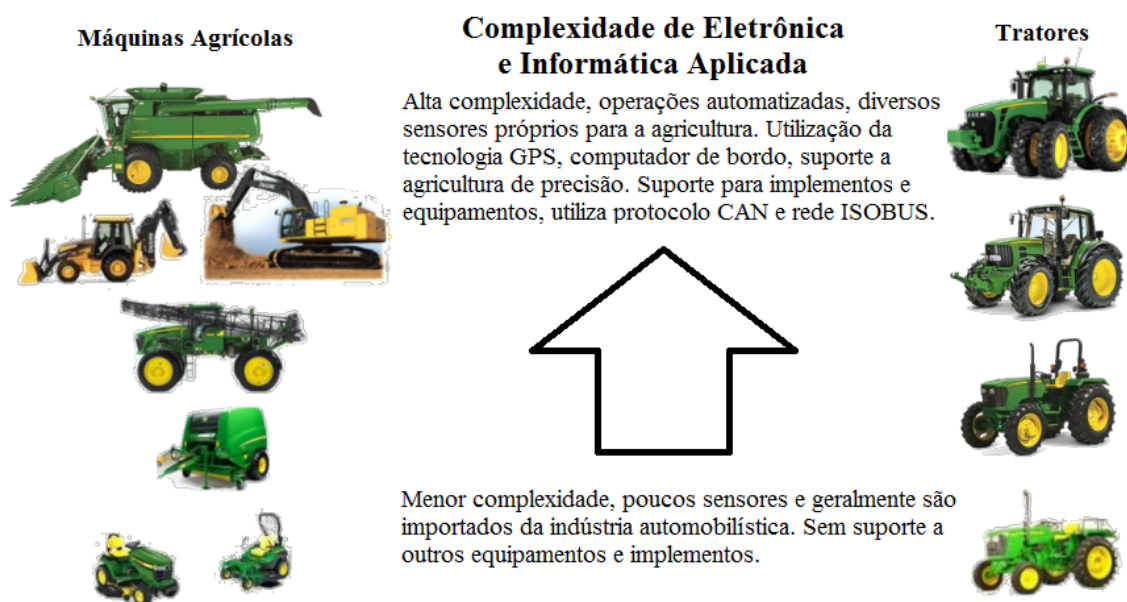
	Patentes depositadas desde 1998	Implementos agrícolas	Mecânica dos Tratores	Eletrônica embarcada
AGCO	27	34,62%	53,85%	11,54%
Class	67	28,79%	57,58%	13,64%
Deere Co.	133	21,97%	67,42%	10,61%
Fóton	8	85,71%	14,29%	-
Mahindra	12	27,27%	72,73%	-
CNH	42	36,59%	58,54%	4,88%

Fonte: Adaptado de Conceição; Valero (2013).

Nota-se que há um esforço importante das empresas em direcionar investimentos para a área de pesquisa e desenvolvimento, em busca de inovações, procurando melhorar o desempenho das máquinas. Percebe-se grande preocupação da fabricante *John Deere*, que investe cerca de 800 milhões de dólares por ano em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos e possui um número elevado de patentes depositadas (CONCEIÇÃO; VALERO, 2013).

A Figura 1 ilustra o nível da utilização de desenvolvimentos para cada modelo de máquina, desde as que possuem menos sensores, automação e eletrônica embarcada até as máquinas agrícolas com maiores aplicações neste sentido.

Figura 1 - Nível de utilização de componentes eletrônicos



Fonte: Adaptado de John Deere (2017).

Na Figura 1 pode-se analisar que os tratores de menor porte e máquinas de pequeno porte possuem um menor nível de eletrônica e informática aplicada, com poucos sensores e aplicações em sua maioria proveniente da indústria automotiva.

Já as colhedeiças e tratores de maior porte possuem um alto nível de eletrônica embarcada e automação. Itens como computador de bordo, com diversos dados coletados através de sensores, possibilidade de interligação com implementos e demais equipamentos com função agrícola, utilização de *Electronic Control Unit* (ECU) ou Unidade de Controle Eletrônico, grande utilização do sistema de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*) para monitoramento e motorização automática.

A quantidade de sensores, atuadores e sistemas de controle são proporcionais aos níveis de tecnologia e funções que uma máquina agrícola desempenha. Sendo assim, segue na seção 2.2 maior abordagem sobre os sensores em máquinas e implemento agrícolas.

2.2. Sensores em Máquinas Agrícolas e Implementos

A mecanização da agricultura foi um dos fatores preponderantes para o aumento da produção agrícola, assim como a substituição da tração animal pelas máquinas agrícolas e avanços tecnológicos atuais como fusão de sensores e aprimoramento da utilização do sistema de posicionamento global (GPS), trazendo novos horizontes para a agricultura.

Segundo Reid (2011), a primeira utilização de sensores na agricultura foi em 1966. A empresa norte-americana Dickey-John, desenvolveu de forma inédita um conjunto de sensores eletrônicos de monitoramento com utilização própria para a agricultura e que permitiram melhores resultados no cultivo. Os sensores foram inseridos nas semeadoras a ar e plantadeiras mecânicas, e monitoravam o espaçamento e número de sementes que eram plantadas de forma automática.

Conforme os registros da época, foi possível economizar 54,5 litros de sementes e elevar a produtividade da colheita em $1,05\text{m}^3$ por hectare (VIAN; JUNIOR, 2010). Comprovando a importância dessa inédita utilização dos sensores em máquinas agrícolas, na década de 1990, sensores similares foram aprimorados para o momento da colheita e para o mapeamento de rendimento, utilizando-se disto para a medição da qualidade da colheita (CONSTABLE; SOMERVILLE, 2003).

Segundo Costa et al. (2015 B), na década de 1980 ocorreu a inserção de sensores já utilizados na indústria automotiva nos veículos agrícolas além de outros sensores de fins agrícolas (como temperatura, umidade, entre outros). Foi uma década de grandes estudos e avanços na área da eletrônica e microcomputadores, que posteriormente viria a se tornar imprescindível na evolução dos sensores (FERO, 2014).

Na década de 1990, com o surgimento de GPS, foram realizados diversos avanços, fator que contribuiu para o crescimento da agricultura de precisão. Na virada do século XXI, a tecnologia GPS se tornou tão precisa que passou a fornecer o posicionamento com possível erro na casa de centímetros. Esses avanços referentes à tecnologia GPS, juntamente com sensores de variação angular e de posição, possibilitaram o desenvolvimento de sistemas para auxiliar a direção de veículos e máquinas agrícolas e, em alguns casos, na automatização completa da direção.

No início da implantação dessa tecnologia era traçada uma rota para o veículo em seus sistemas, e por meio dos sensores e do sinal do GPS era analisada a rota que deveria ser traçada. Com isso o motorista era avisado por meio de sinais sonoros e/ou visuais do andamento da rota (REID, 2011).

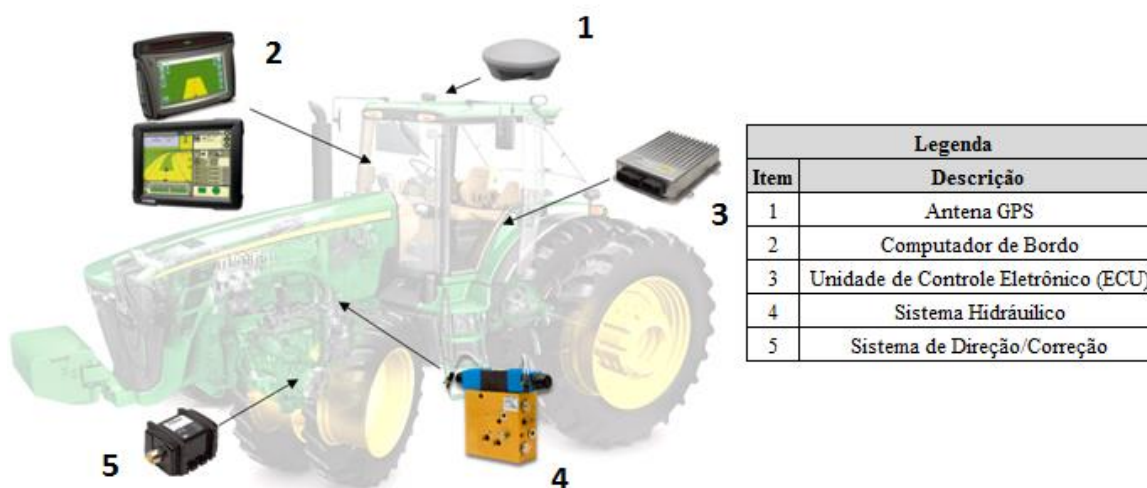
Atualmente, a tecnologia possibilita que ocorra a locomoção do veículo através de uma rota pré-definida e a função do operador fica somente para manobras de cabeceiras. Essa tecnologia já é amplamente utilizada nos Estados Unidos, mas no Brasil não se pode comprovar uma utilização notável, principalmente pelo alto valor atribuído e pelo atraso que os principais lançamentos das montadoras chegam ao país.

Essa tecnologia traz diversos fatores positivos, como a diminuição dos erros do operador e a possibilidade de direção com pouca iluminação (ou em condições de tempo menos favoráveis).

Segundo Mulla (2013), os principais desafios para o uso do sensoriamento remoto via satélite são a dificuldade da coleta de imagens em dias com muitas nuvens e a necessidade da calibragem em solo dos equipamentos.

A utilização de GPS facilita a agricultura de precisão tanto no preparo da terra, quanto no controle de pragas ou na colheita das culturas. Ilustra-se na Figura 2, os principais elementos da comunicação por GPS de uma máquina agrícola.

Figura 2 - Principais elementos da comunicação por GPS de uma máquina agrícola



Fonte: Adaptado de Dickey-John (2017).

Dos principais elementos da comunicação por GPS em uma máquina, o item 1, a Antena é que faz a troca de informações com os satélites para coleta de suas coordenadas

atuais; o item 2 é o Computador de Bordo, local que é inserido o trajeto inicial do veículo ou máquina e demonstra ao condutor demais informações de controle. Essas informações passam pelo item 3, a unidade de controle eletrônico (ECU) dos sensores e equipamentos. Toda a comunicação passa por ela. A ECU também passa ao item 4 (Sistema Hidráulico), as informações para atuação na direção da máquina. O item 5 é o sistema de Direção/Correção, que trabalha em conjunto com os demais sensores, para a direção e correção do trajeto pré-definido.

Com o aumento de tecnologias se exige compatibilidade e interação entre elas e, para suprir essa necessidade, têm sido adotados padrões baseados em protocolos de comunicação digital serial, como o *Controller Area Network* (CAN) e o *Local Interconnect Network* (LIN). No caso do trator da Figura 2, tem-se uma rede de comunicação ligada entre a ECU e o computador de bordo. Como a comunicação é realizada através de um protocolo, os dados que trafegam pela rede podem ser utilizados por outros equipamentos ou implementos conectados a esta rede.

Outra aplicação que atualmente possuem diversos estudos e investimentos é a agricultura de precisão, que utiliza sistemas para a gestão do local da produção e consequentemente do controle da cobertura do terreno pelo seu maquinário. Com o auxílio de sensores, sistemas informatizados e dados do GPS, o agricultor pode analisar e atuar em sua lavoura, coletando informações sobre seu rendimento e se precisa de fertilizantes ou aditivos em dosagem específica.

Os principais fabricantes já introduzem o suporte para a agricultura de precisão em suas máquinas, veículos e implementos agrícolas. Os principais itens para esse modelo de produção são a instalação de sensores de umidade, qualidade do solo, quantidade de grãos, entre outros. Esses dados são coletados pelos sensores e mapeados através das informações obtidas por GPS a cada momento, procedimento feito em toda área de produção. Esses dados são coletados localmente no equipamento ou podem ser enviados remotamente para uma central de monitoramento na fazenda.

As informações são processadas com auxílio de sistemas de geoprocessamento, que geram um mapa de toda a área detalhando os atributos de cada local. Com esse estudo pode-se verificar as áreas com melhor produtividade, assim como as áreas que necessitam de maior controle de pragas e a qualidade da colheita (SANTOS, 2007).

A agricultura de precisão é uma área que vem passando por constante evolução, sendo objeto constante de novos desenvolvimentos. Isso significa que para cada novo tipo de cultura

ou implemento agrícola, são pensados em dispositivos que podem auxiliar e trazer mais dados concisos, contribuindo para a tomada de decisão do produtor.

Um exemplo dessa utilização é a colhedeira de modelo 1175 da fabricante *John Deere*, que possui um sistema interno que grava as informações recolhidas da antena GPS e correlaciona com as informações dos sensores de fluxo de massa (mede a quantidade de colheita) e de umidade. Com esses dados é possível traçar mapas de desempenho, total da colheita, umidade dos grãos e demais informações importantes ao agricultor (JOHN DEERE, 2015).

Com a constante expansão do número de sensores nas máquinas e implementos, a fusão de sensores ou fusão de dados é um tema difundido recentemente. A fusão de dados pode relacionar diferentes grandezas correlacionadas, equipamentos e/ou dados. Um sensor ou equipamento consegue medir e atuar até certo limite e os dados gerados normalmente não se estendem a outros equipamentos. A fusão traz a convergência dos dados produzidos pelos sensores de todos os equipamentos, e permite a realização de processamento ou dados através de computadores para a melhor decisão dos próximos passos do cultivo (COSTA et al., 2015 B).

Segundo Blank et al. (2011), são grandes os desafios no estudo da fusão de dados pela grande quantidade de equipamentos sem padrão internacional e sistemas construídos de forma isolada, sem possibilidade de conexão com outros equipamentos.

Algumas iniciativas trabalham para difundir a padronização e aumentar a utilização delas pelos fabricantes, como a *Agricultural Industry Electronics Foundation* (AEF), que é uma organização independente criada por fabricantes de equipamentos agrícolas e associações com intuito da continuação do desenvolvimento internacional e divulgação de tecnologia eletrônica e elétrica, assim como a implementação de normas eletrônicas e cooperação entre os fabricantes (AEF, 2017).

2.2.1 Identificação de Sensores em Máquinas Agrícolas

Uma das etapas iniciais para a aplicação do MBD é o entendimento do funcionamento das máquinas agrícolas e principalmente os sensores ligados as ECUs e suas funções específicas. Essa identificação serve como parâmetro para todas as etapas futuras do MBD, pois através dela pode-se posteriormente definir os requisitos iniciais para cada função da ECU.

Como forma de ilustrar diferentes aplicações da utilização de sensores em máquinas e implementos agrícolas, seguem a identificação dos principais sensores em 2 estudos de casos:

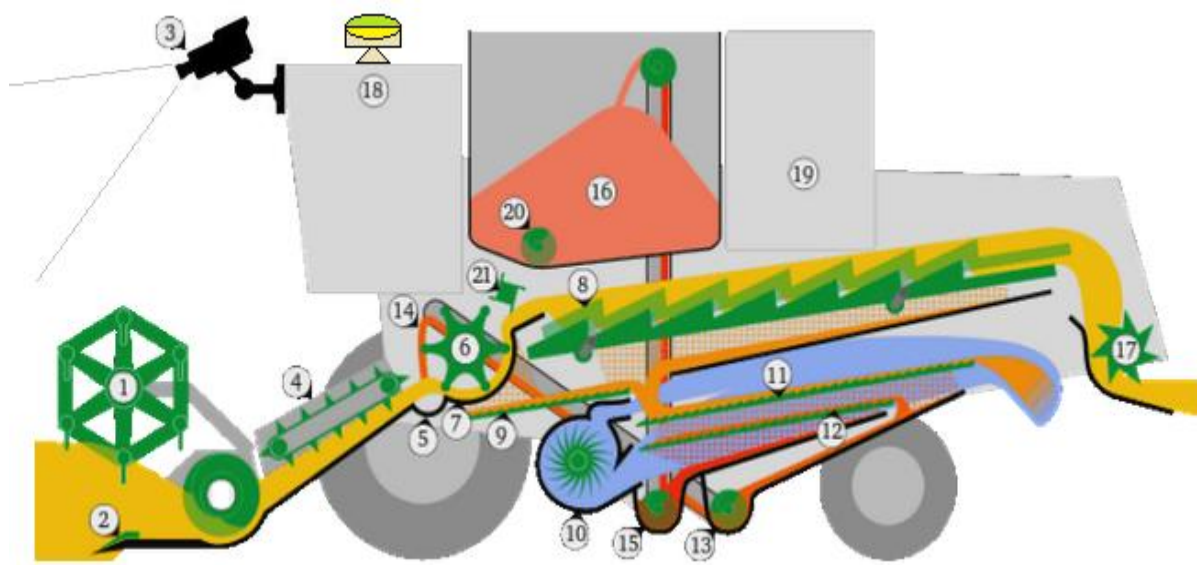
Uma Colhedora Automotriz e uma Plantadeira. Utilizou-se o estudo de caso da Plantadeira para a aplicação da modelagem para desenvolvimento de uma ECU que controle seus principais sensores.

2.2.1.1 Colhedora Automotriz

Colhedora Automotriz é um equipamento agrícola destinado à colheita de lavouras, sua função é o corte das plantas e direcionamento para os mecanismos de trilha, que consiste na separação dos grãos de suas envolturas e de partes de suporte na planta; separação do grão e da palha e limpeza.

Os principais sensores de máquinas agrícolas, neste primeiro caso, uma colhedora automotriz, conforme ilustrado na Figura 3 e com os respectivos sensores detalhados na Tabela 4.

Figura 3 - Exemplificação máquina agrícola (no caso uma colhedora automotriz) com identificação dos principais sensores



Fonte: Adaptado de Costa et al. (2015 B).

Analisa-se pela Figura 3 e Tabela 4 que as colhedoras são equipamentos de grande porte e possuem uma elevada aplicação de eletrônica embarca, sensores e alto investimento em tecnologia pelos fabricantes. Na maioria dos casos, não necessitam estarem acopladas a outro equipamento para realizar suas atividades.

Alguns equipamentos contam com sistemas de direção automática e suporte a agricultura de precisão, com informações como mapas de produtividade e nível de perda de

grãos direto na cabine e em tempo integral; estas aplicações auxiliam em uma colheita efetiva e na tomada de decisão do agricultor nos próximos cultivos.

Tabela 4 – Identificação dos principais sensores por item indicados na Figura 3

Peça/Parte da Máquina	Item	Possíveis sensores associados
Rolo	1	Sensor de movimento / rotação / de altura do solo
Barra de corte	2	Sensor metálico e de rotação
Captura de imagens	3	Sensor de imagens / Câmera
Transportador de Grãos	4	Sensor de movimento de esteira / corrente
Tambor de debulhação	6	Sensor de fluxo / advertência
Deslocador de Palha	8	Sensor de rotação / travamento
Bandeja de Grãos	9	
Ventilador	10	Sensor de rotação / sobre corrente (Travamento)
Peneira ajustável de cima	11	Sensor de inclinação / vibração / rotação
Peneira de fundo	12	Sensores de perda de grão
Transportadora Rejeitos	13	Sensores de vibração e indutivo de movimento
Redebulhador de rejeitos	14	Sensor de Fluxo de palha
Trado de grãos	15	Sensor de rotação / travamento / fluxo de grãos
Tanque de grãos	16	Sensor de nível de grãos, de umidade
Cortador de palha	17	Sensor de fluxo / advertência
Cabine	18	Sensor de posição geográfica / rádio / painel de instrumentos / tacômetro
Motor	19	Sensores de pressão e nível de óleo / nível de combustível / e outros sensores atrelados ao motor e injeção eletrônica
Outras posições (para analisar solo)		Sensores ópticos (Infravermelho Próximo), sensores de solo para análise de pH, sensores eletromagnéticos, etc.

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2015 B).

2.2.1.2 Plantadeira

No segundo caso de estudo de máquinas e implementos agrícolas utilizou-se uma plantadeira, que é um implemento que possui por função principal distribuir sementes no solo, seja ele preparado de forma convencional ou por práticas conservacionistas, em certa quantidade de sementes e com uma disposição predeterminada (GARCIA, R. F., 2012).

Na Figura 4 ilustram-se as principais funções desempenhadas por uma plantadeira, iniciando pela abertura do sulco no solo, passando para a modelagem de sulco para melhor recepção da semente, a cobertura do sulco com terra e compactação da semente no solo.

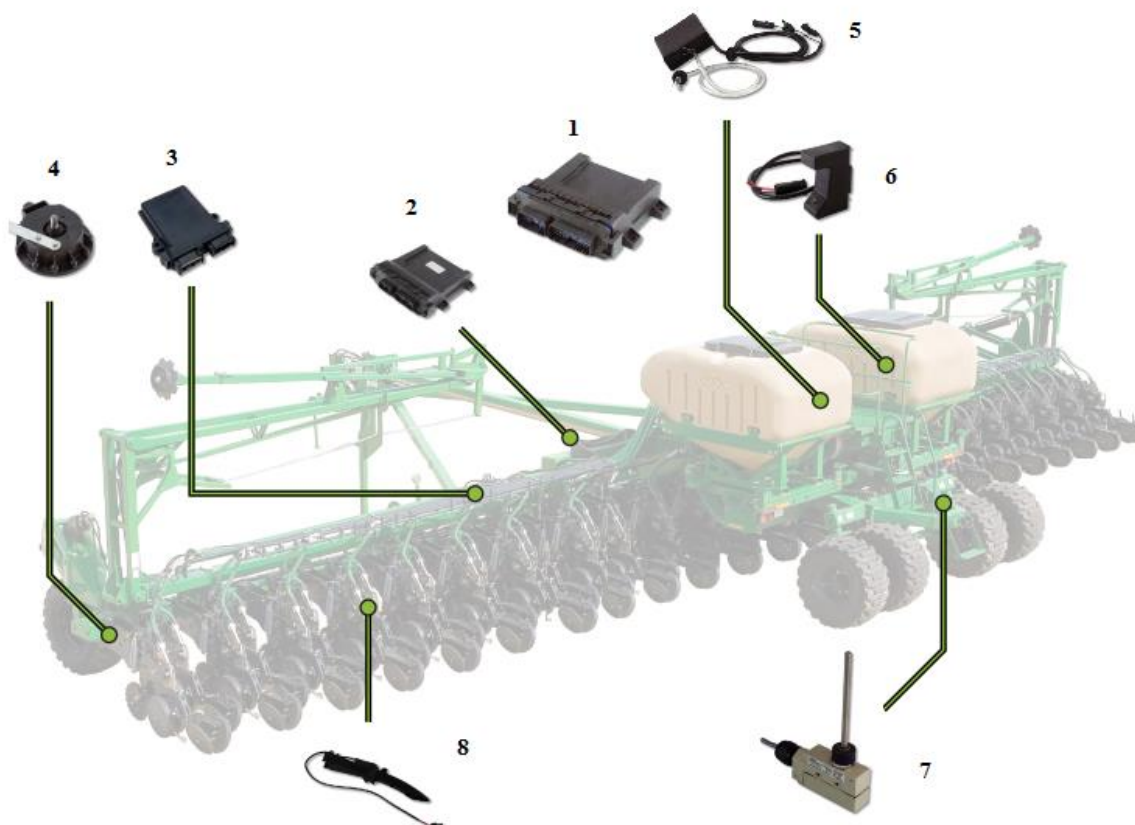
Figura 4 – Principais funções desempenhadas por uma plantadeira



Fonte: Adaptado de (GARCIA, 2012).

Ilustra-se a identificação dos principais sensores de máquinas e implementos agrícolas, neste segundo caso uma plantadeira, onde constam os sensores e ECUs necessárias para seu funcionamento, conforme ilustrado na Figura 5 e com os respectivos sensores detalhados na Tabela 5.

Figura 5 - Exemplificação dos sensores e ECUs uma plantadeira



Fonte: Adaptado de Dickey-Jhon (2016).

Tabela 5 – Identificação dos principais sensores por item indicados na Figura 5

Item	Descrição
1	Unidade de Controle Eletrônico Trator
2	Unidade de Controle Eletrônico Plantadeira
3	Unidade de Controle Eletrônico Plantadeira Auxiliar
4	Sensor de Rotação de Eixo
5	Sensor de Vácuo
6	Sensor de Nível de Sementes
7	Sensor de Levante do Implemento
8	Sensor do Tubo de Sementes

Fonte: Adaptado de Dickey-Jhon (2016).

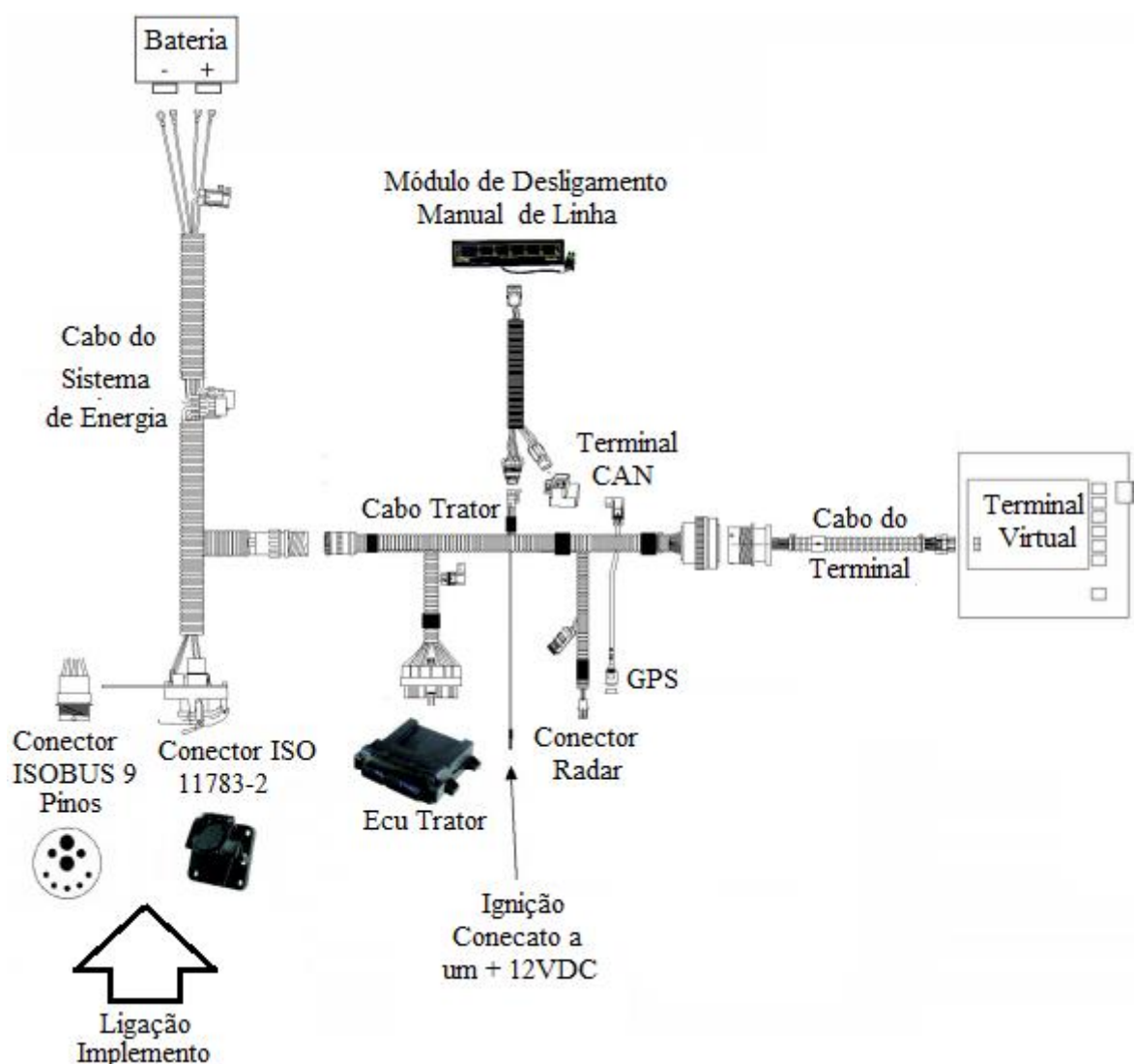
Como a plantadeira é um implemento, ele deve estar acoplado a um trator para sua locomoção. As duas máquinas devem ter suporte a comunicação para que ambas possuam as mesmas informações e estas informações, após devido tratamento, possam ser exibidas ao condutor na cabine. O exemplo da Figura 5, ambos possuem comunicação via protocolo ISOBUS, para que as informações geradas pelo implemento possam ser visualizadas e analisadas pelo terminal virtual de dentro do trator.

Nota-se ainda no exemplo da Figura 5, que além dos sensores próprios do implemento, constam 3 modelos de ECUs: o Item 1 é a ECU do Trator, essa gera a alimentação das entradas CAN e dos sensores do trator; o Item 2 que é a ECU da Plantadeira, com todos os parâmetros do sistema, constantes e memória são armazenados nesta ECU e o controle dos sensores da plantadeira; e o Item 3 é uma ECU Auxiliar da Plantadeira, dependendo do número de linhas que a plantadeira possui é necessária esta ECU para auxiliar no processamento das informações coletadas dos sensores.

Como forma de exemplificar a comunicação pela rede CAN entre sensores, ECUs e demais itens que compõe o sistema elétrico de dados, seguem nas Figuras 6 e 7, respectivamente o exemplo de cabeamento de dados desde o trator e o sistema elétrico de dados de uma plantadeira, demonstrando desde o terminal virtual, com as informações ao condutor de dentro da cabine do trator até os sensores na plantadeira.

Na Figura 6 pode-se verificar o diagrama de exemplo de cabeamento de dados de um trator, das ligações desde a cabine do trator (terminal virtual) até o conector do CAN que se conectará com o implemento, passando pelos sensores exclusivos do trator (GPS, radar) e com ligação na ECU do trator até a bateria.

Figura 6 – Exemplo do cabeamento de dados de um trator

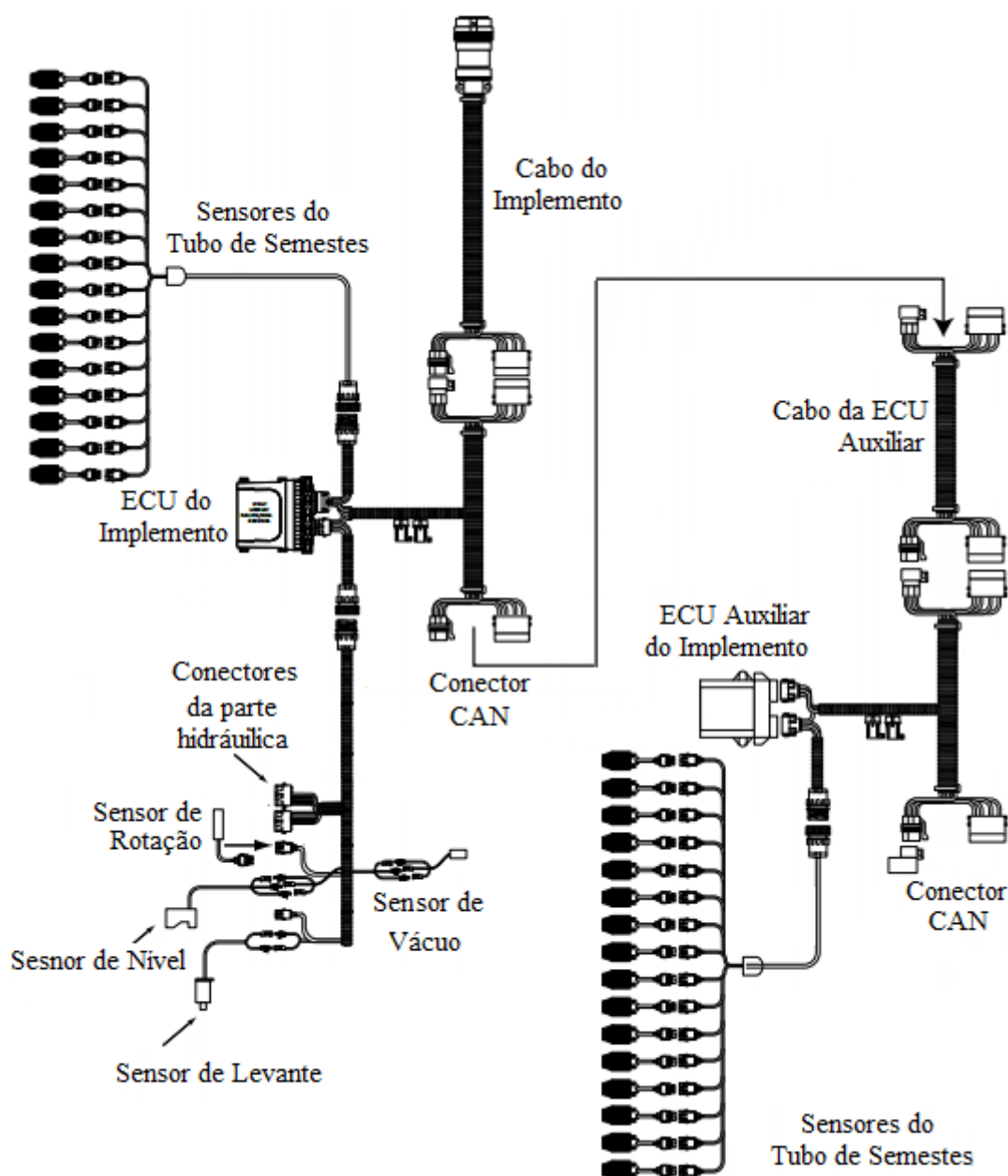


Fonte: Adaptado de John Deere (2016).

Na Figura 7 apresenta-se o diagrama do exemplo do cabeamento de dados de uma plantadeira, demonstrando as ligações entre os sensores já identificados anteriormente com a ECU principal e a ligação da ECU auxiliar quando inserida uma nova linha de tubos de sementes até o conector CAN.

Aplicou-se a metodologia de desenvolvimento baseado em modelos em alguns dos sensores da plantadeira identificados na Figura 5 e Tabela 5. As ilustrações do funcionamento da ligação elétrica de dados do trator e da plantadeira demonstradas nesta seção tiveram utilização no trabalho dentro do desenvolvimento do modelo.

Figura 7 – Exemplo do cabeamento de dados de uma plantadeira



Fonte: Adaptado de John Deere (2016).

2.2.2 Tipos de Sensores

Nota-se na identificação dos sensores da colhedeira automotriz e da plantadeira que as máquinas e implementos agrícolas possuem variadas funções e tipos de sensores. Nesta seção estão descritos os sensores da plantadeira que se aplicou a metodologia de desenvolvimento baseado em modelos e seu modo de funcionamento.

Inicialmente segue a diferenciação entre os termos sensor e transdutor. Sensor é um dispositivo que converte uma grandeza física de qualquer espécie em outro sinal que possa ser

transmitido a um elemento indicador (FUENTES, 2005). Já o termo transdutor é a denominação de um sistema completo, que contém o sensor, utilizado para transformar uma grandeza qualquer em outra e pode ser utilizado por sistemas de controle (WENDLING, 2010). Neste trabalho, utilizou-se o termo sensor para todos os equipamentos da plantadeira.

Há características que podem ser relacionadas para a classificação dos sensores, seguem algumas delas. Os tipos de sensores podem ser classificados com relação a:

- Tipo de grandeza física ou físico-química que o sensor é estimulado;
- Ativo ou passivo;
- Analógico ou discreto;
- Tipo de alimentação;
- Linearidade; entre outros.

Em especial, os dispositivos sensores podem possuir circuitos de condicionamento de sinal que permitem ser classificados em função do seu sinal de saída: analógico ou digital.

Os sinais analógicos apresentam valores contínuos e infinitos dentro de um *range* (extremos) de operação (por exemplo, de 0 a 5V), enquanto que um sinal digital nada mais é do que um circuito que compara o valor analógico por um limiar, apresentando na saída apenas duas opções ('0', se o sinal for abaixo do limiar e '1', se for maior que o limiar).

Ainda existem dispositivos sensores que convertem um sinal analógico codificando-o de forma digital, transmitindo-o de forma serial.

Esta classificação é importante, pois é em função desta característica que os projetos propostos serão detalhados. Como exemplo de sensor digital, cita-se, um sensor de presença de tanque de graneleiro de uma plantadeira, que é instalado na parte inferior do tanque e possibilita a leitura, pela ECU, se o tanque possui ou não semente naquela altura do tanque. Já como exemplo dos sensores analógicos, cita-se o sensor que informa a altura em relação ao chão da barra de um pulverizador.

A seguir, são detalhados os modos de funcionamento dos sensores utilizados nos projetos, para os quais a metodologia de desenvolvimento baseado em modelos foi aplicada:

a) Sensor de Nível do Tanque:

Os sensores de nível do tanque detectam o nível de sólidos ou líquidos em tanques e reservatórios na altura em que forem instalados. No caso da plantadeira, na maioria das vezes, são instalados dentro do tanque graneleiro do equipamento, neste tanque são guardadas as sementes que a plantadeira despeja no solo.

Nas plantadeiras comerciais, geralmente são instalados sensores com saída digital do tipo infravermelho por barreira, instalados no fundo do tanque. A partir do sinal de saída desse sensor e do tratamento deste, informações a respeito do nível de sementes no reservatório podem ser levadas ao condutor do trator, possibilitando tempo para que o condutor possa planejar o reabastecimento de sementes. Com esse tipo de instalação, é analisado quando as sementes estão chegando no final do tanque.

Neste estudo utilizou-se o sensor de infravermelho por barreira, esse tipo de sensor consiste tipicamente pela emissão de luz infravermelha através de um ponto e recepção desse sinal em outro ponto, utilizou-se nesse estudo um sensor com saída digital que o emissor e o receptor estão no mesmo equipamento. No caso de recebimento do sinal infravermelho pelo receptor, a saída do sinal digital é '1', em caso de não recebimento a saída do sinal digital é '0'. O funcionamento deste sensor é próximo ao do sensor de sementes, melhor detalhado nesta seção. Segue na Figura 8, ilustração de um sensor de infravermelho por barreira (PATSKO, 2006).

Figura 8 – Ilustração de um sensor fotoelétrico de infravermelho por barreira



Fonte: Adaptado de Agrosystem (2017).

b) Sensor de Vácuo:

O mecanismo dosador das sementes é o responsável por dosar a quantidade de sementes que serão distribuídas, recebendo as sementes do tanque graneleiro para os tubos de sementes. Esses mecanismos devem ser capazes de permitir o mínimo dano possível para as sementes. Os tipos mais utilizados atualmente são: disco perfurado, rotor analado, dedo prensor, copo distribuídos e dosador pneumático (SILVA; KLUTHCOUSKI; SILVEIRA, 2000).

Os dosadores de precisão mecânicos têm, geralmente, a forma de discos alveolados que captam as sementes no final de um reservatório e, ao girar, transportam as sementes até aos tubos de sementes. Os dosadores pneumáticos contêm discos perfurados, nestes atuam os

efeitos de sucção de ar, mantendo uma semente por vez até uma abertura de saída aonde o diferencial de pressão é eliminado e as sementes passam para o tubo (SANTOS, 2007).

Segundo Balastreire (1987), os dosadores pneumáticos possuem a vantagem de a dosagem de sementes ser uma a uma, diminuindo o dano as sementes. A plantadeira utilizada nesse estudo como simulação utiliza a dosagem pneumática. Com a utilização desse tipo de dosador, a instalação de um sensor para a medição da pressão interna é interessante para analisar o funcionamento do sistema.

O sensor de vácuo é instalado dentro do sistema do dosador e mede constantemente a pressão negativa do ar no conjunto do disco, pois a sucção da semente somente ocorre se a pressão estiver dentro de uma certa faixa de operação. Caso a pressão aplicada seja inferior a necessária haverá perda de sementes no trajeto até o tubo de sementes. Caso contrário, a semente pode ficar presa, gerando falhas no processo de plantio.

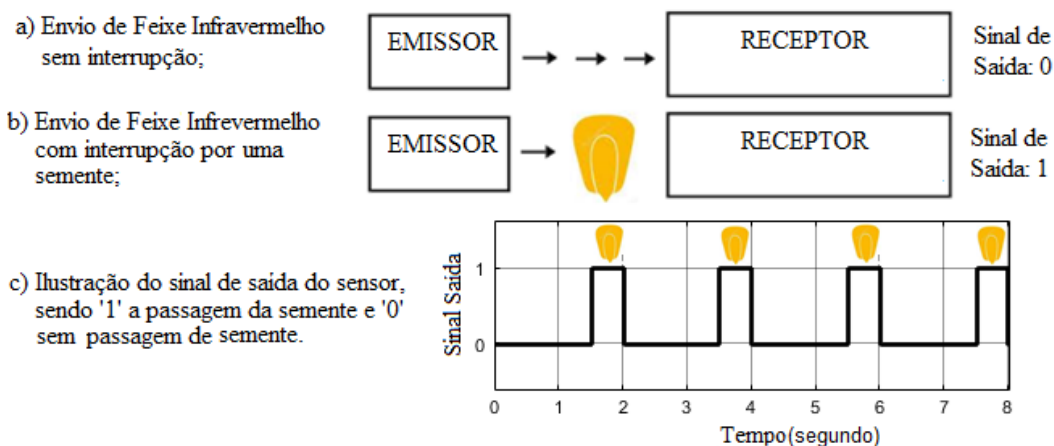
c) Sensor de Sementes:

Seguindo o caminho da semente até o solo, após a passagem pelo disco de plantio, a semente é despejada aos tubos de sementes, estes tubos são o caminho para a semente ser lançada de maneira correta no solo. As plantadeiras possuem variados números de tubos, modelos com baixo número de tubos até modelos com 32 tubos ou mais. Além disso, dentro de cada tubo existe um sensor que informa da passagem da semente, com elevado nível de precisão (LAN et al., 1999).

Neste estudo, os sensores utilizados para o tubo de sementes possuem sinal de saída digital, com utilização de infravermelho com detecção por barreira. Neste tipo de sensor, ocorre uma emissão de sinal infravermelho pelo emissor e o sistema possui um receptor instalado no lado oposto na mesma direção, quando um objeto, neste caso, sementes, interrompe este sinal sua saída é alterada. Por exemplo, em caso de '0' com sinal infravermelho recebido, envia saída '1' ao não receber o sinal infravermelho (PATSKO, 2006).

Na Figura 9 ilustra-se o funcionamento de um sensor fotoelétrico. Figura 9(a) mostra o caso com o tubo sem sementes, portanto, o sinal do infravermelho de barreirado emissor é recebido pelo receptor, produzindo sinal '0'. Na Figura 9(b), tem-se o caso da semente dentro do tubo, portanto, obstruindo a recepção do feixe de infravermelho pelo receptor, e produzindo sinal '1'. Na Figura 9(c) consta um gráfico da saída do sinal do sensor por tempo de execução, ilustrando que quando está no momento de saída '1', uma semente está passando pelo sensor.

Figura 9 - Funcionamento de um sensor fotoelétrico tipo barreira



A partir do tratamento da informação da saída do sensor, associado a velocidade de deslocamento da máquina, é possível a estimativa da população de sementes por unidade de área e, de igual forma, gerar informações especializadas quando do uso da geolocalização.

d) Sensor de Velocidade Indutivo:

A velocidade do implemento é um fator importante dentro do processo do plantio, em caso de realizar a operação em velocidade acima da recomendada pelo implemento, existe a possibilidade de aumento na perda de produção. Por esse motivo, na plantadeira consta a instalação de um sensor que mede a velocidade do implemento. Para que se obtenha o melhor desempenho da plantadeira no semeio, o implemento deve estar funcionando em velocidade baixa e compatível com suas recomendações. Normalmente a velocidade máxima que a plantadeira pode atingir é 15 quilômetros por hora (km/h) (BERTELI et al., 2016).

Geralmente, o trator possui um sensor de velocidade instalado, porém é interessante a instalação em um sensor de velocidade também no implemento, que além de medir a velocidade pode auxiliar na identificação da falha de correntes e roldanas, entre outras falhas no sistema de rodagem.

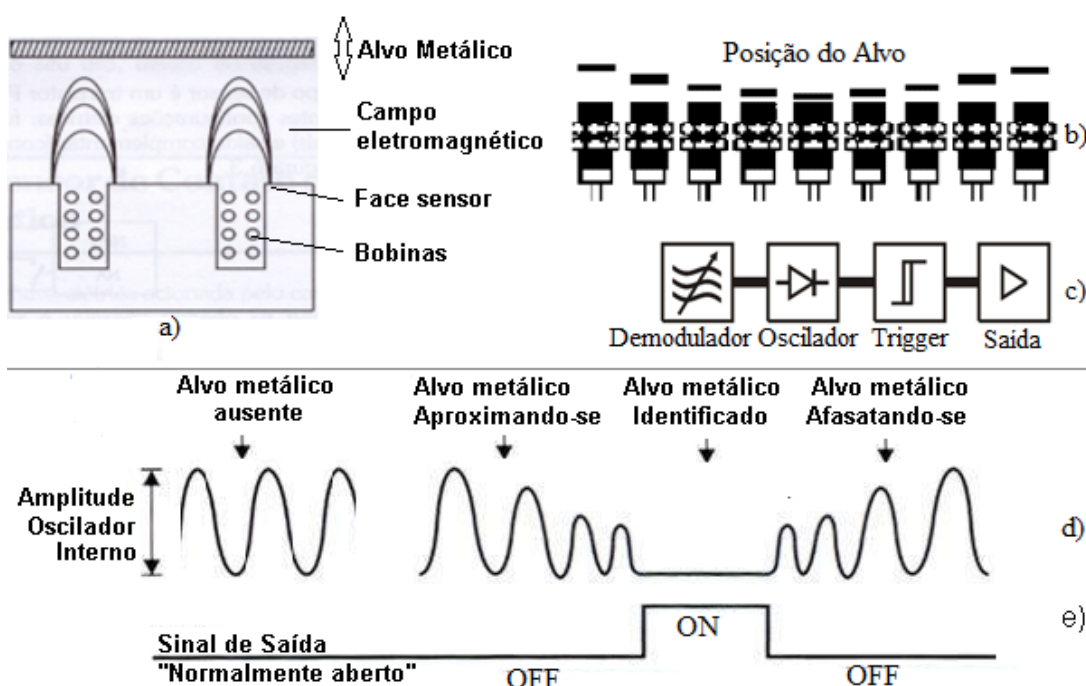
Neste estudo optou-se por um sensor de velocidade do tipo indutivo instalado em uma das rodas do implemento, este tipo de sistema se adequa facilmente ao sistema de rodas da plantadeira e consegue fornecer uma boa leitura dos valores (FRANCETTO et al., 2015).

Os sensores de velocidade indutivos são emissores de sinal, que detectam, sem contato direto, elementos metálicos que atravessam seu campo magnético, convertendo em sinal elétrico está perturbação no campo. A Figura 10, apresenta o funcionamento do sensor indutivo, sendo na Figura 10(a) é a ilustração do sensor com a descrição dos principais itens,

na Figura 10(b) ilustra-se a posição do alvo com a aproximação, na Figura 10(c) é o diagrama de blocos, na Figura 10(d) oscilador em função da aproximação do alvo, e em e) a saída digital do sensor em níveis de tensão.

Para seu funcionamento, é instalada uma engrenagem no sistema de rodas do implemento para que o sensor possa contar os pulsos e realizar o cálculo baseado no período da roda (VIZZOTTO, 2014). O sensor possui sinal de saída digital e seu funcionamento é através da contagem dos pulsos por volta da roda dentada em um certo tempo.

Figura 10 – Ilustração do funcionamento de um sensor indutivo



Fonte: Adaptado de BONACORSO, 2004 e LUGLI; RODRIGUES, 2013.

e) Sensor de Rotação do Eixo:

Nas plantadeiras os sistemas de distribuição de fertilizante e semente tem seu funcionamento determinado por uma regulação prévia de maneira que, com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina, ocorre o aumento proporcional de giro dos eixos motrizes destes sistemas. Em específico no caso do fertilizante que, para a maioria das máquinas, apresenta-se como um dosador helicoidal com distâncias variáveis em função da dosagem máxima necessária, quanto maior a rotação do eixo motriz desse, maior será a taxa aplicada.

O sensor de eixo tem por finalidade avaliar a rotação do eixo de distribuição de fertilizante, por exemplo, a fim de permitir a determinação das taxas de aplicação em tempo

real. Por ter sua instalação próxima ao eixo de controle, o funcionamento correto do eixo pode ser analisado através do sinal de saída desse sensor.

Nesse estudo optou-se por um sensor de rotação do eixo com saída digital do tipo indutivo, com funcionamento próximo ao já detalhado no item (d) sensor de velocidade indutivo, por contagem dos pulsos por volta do eixo em um certo tempo.

Apesar do sinal de saída do sensor ser digital, pelo motivo da validação ser de forma manual, na simulação do modelo simulou-se de forma analógica, podendo ser empregada com um conversor de frequência para este sensor.

f) Sensor de Levante do Implemento:

Dentre de alguns fatores na produção, um que merece destaque é o relevo. Áreas de relevo ondulado acentuam processos erosivos e tendem a dificultar o plantio (FRAGA; SALCEDO, 2004). Além das possíveis derrapagens das rodas prejudicando o sistema de funcionamento da plantadeira, o terreno irregular força a plantadeira a abrir os sulcos em posições não indicadas, com isto a semente não é despejada na altura correta.

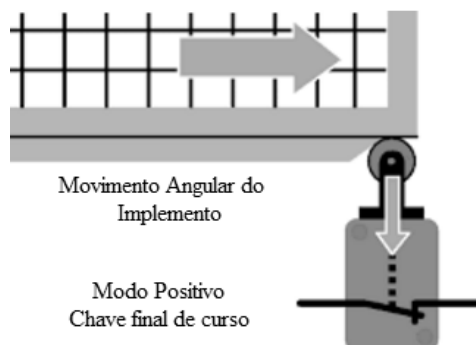
Para diminuição da perda de sementes e melhor qualidade do plantio, o implemento deve estar em uma posição que suas rodas toquem o chão e que suas linhas de tubos de sementes estejam alinhadas com o solo e sem demasiada inclinação.

O sensor de levante do implemento auxilia na análise se o implemento está ou não na posição correta de plantio. Geralmente é instalado próximo a estrutura onde estão as rodas e o devido tratamento da informação da saída pode informar na cabine quando o implemento está com uma inclinação que possa prejudicar o semeio.

Neste caso de estudo optou-se por um sensor com a saída digital, quando o implemento está em uma posição não adequada para o semeio, o sinal de saída do sensor é '1', que com devido tratamento e análise deste sinal de saída pode avisar o condutor que a posição atual da plantadeira não é a indicada e pode ocorrer desperdício de sementes.

Na Figura 11 ilustra-se o funcionamento do sensor de levante do implemento, no caso de a estrutura estar em posição inadequada para o plantio, é acionada a chave de fim de curso, assim alterando o sinal de saída.

Figura 11 – Ilustração do funcionamento do sensor do levante do implemento



Fonte: Adaptado de Rockwell Automation, 2015.

g) Sensor de Posicionamento Global:

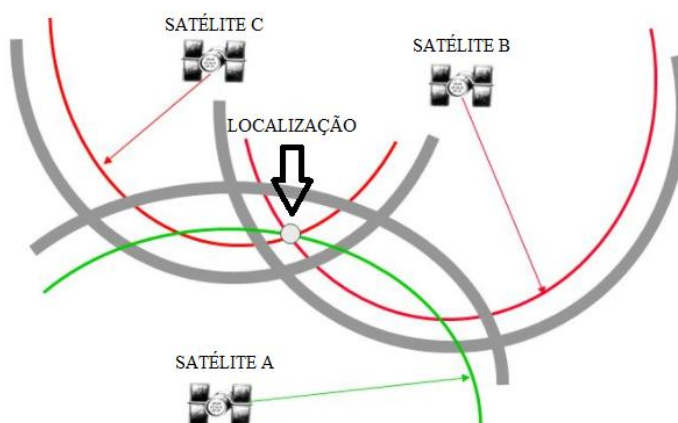
O GPS (*Global Positioning System*), ou Sistema de Posicionamento Global, é um sistema de posicionamento geográfico que nos fornece as coordenadas de um lugar na Terra, desde que se tenha um receptor de sinais de GPS. Uma determinada posição sobre a Terra é referenciada em relação ao equador e ao meridiano de Greenwich e traduz-se por três números: A latitude, a longitude e a altitude. Assim, para saber uma determinada posição na Terra basta saber a latitude, a longitude e a altitude (BERNARDI; LANDIM, 2002).

Os modelos recentes de sensores de posicionamento global, além de fornecerem informações de latitude, longitude e altitude, fornecem informações como velocidade em quilômetros por hora, horário e informações sobre os satélites que estão fornecendo os dados. Este conjunto de informações que o sensor fornece juntamente com demais sensores da plantadeira podem gerar informações interessantes para o plantio, como taxa de sementes por metro ou taxa de sementes por tempo. Algumas destas informações, auxiliam em um melhor planejamento de semeio, estão neste projeto.

Os GPS utilizam um sistema chamado de triangulação para a determinação da localização do receptor na terra. A triangulação funciona da seguinte forma: três satélites enviam o sinal para o receptor, que calcula quanto tempo cada sinal demorou a chegar ao receptor. Além da sua localização terrestre, o receptor GPS consegue também saber a altura do receptor em relação ao nível do mar, porém para isso é necessário um quarto satélite.

Neste caso de estudo optou-se por um sensor de posicionamento global com sinal de saída analógica e suporte para conexão com o microcontrolador utilizado neste projeto e que fornece suas informações com baixo tempo de atualização e pela porta serial. Na Figura 12, ilustra-se a triangulação dos satélites para a obtenção do posicionamento na terra.

Figura 12 – Ilustração do sistema de triangulação dos satélites



Fonte: Adaptado de BEZERRA NETO, 2013.

2.3. Eletrônica Embarcada

Tecnologias disponíveis no mercado recentemente são concebidas para aquisição, armazenamento e transmissão de uma grande quantidade de dados e informações que podem ser adquiridos automaticamente na lavoura. Um número crescente de sensores agrícolas, dispositivos de processamento e armazenamento, e atuadores são implementados usando padrões de comunicação para troca de informações diferentes. A eletrônica embarcada em máquinas agrícolas, tratores e implementos não podem ser dissociados de um sistema que inclua microprocessador e, conseqüentemente, de um sistema eletrônico digital com software e hardware (SOUSA; LOPES; INAMASU, 2014).

Este sistema computacional é caracterizado por um sistema eletrônico embarcado que, normalmente, possui uma Unidade Central de Processamento (CPU), memórias e conjunto de elementos para entradas e saídas de dados. Os dados das entradas são fornecidos por sensores ou demais dispositivos de leitura de dados. Geralmente as saídas são fornecidas por sinal digital e podem servir para acionamento de diversos dispositivos como lâmpadas, válvulas e demais atuadores (DENARDIN, 2015).

Principalmente com aplicação na indústria automobilística, em tratores e máquinas agrícolas, estes computadores embarcados, conhecidos como unidade de controle eletrônico ou ECU, têm sido empregados em quantidades diversas de máquinas e operações, para que cada qual realize diferentes tarefas, como, por exemplo, o controle da comunicação com o operador, controle do motor e transmissão, funções específicas agrícolas, leitura e registro de tarefas, leitura do posicionamento, entre outras.

Segundo Neme (2014), alguns tipos de ECUs principalmente utilizados na indústria automobilística, são: módulo de gerenciamento do motor (ECM), módulo de gerenciamento de *powertrain* (*Powertrain control module*, PCM), módulo de gerenciamento da transmissão (*Transmission control unit*, TCU), módulo de controle do freio (*Electronic Brake Control Module*, EBCM), módulo de controle central (*Central Control Module*, CCM), módulo eletrônico geral (*General Electronic Module*, GEM), módulo de controle da carroceria (*Body Control Module*, BCM) e o módulo de controle de suspensão (*Suspension Control Module*, SCM).

O projeto de desenvolvimento da ECU para máquinas agrícolas deve levar em consideração uma série de variáveis, como a variedade de funções e grau de tecnologia empregada de sensores e atuadores. A ECU deve estar projetada para efetuar a leitura dos valores em sensores com saída analógicas e digitais, realizar o processamento destes valores em alguns casos e eventualmente fornecer a saída da informação para equipamentos ligados a ela.

Além da variação do tipo de sinal, a ECU deve dar suporte aos sensores e atuadores com diversos níveis de tecnologia empregada. Sensores que possibilitam realizar a leitura do valor de saída e não realizam nenhum tipo de processamento até sensores com alta tecnologia empregada, que já realiza o processamento da informação em tempo real e envia o sinal para a atuação, como exemplo alguns sensores utilizados em colhedadeiras para a agricultura de precisão, que analisa o caminho pré-definido no computador de bordo pelo qual a colhedeira está indo e faz a correção em caso de erro.

A criação e o desenvolvimento dessas ECUs tanto pela indústria automotiva como pela indústria de máquinas agrícolas são realizadas, geralmente, internacionalmente e em código de linguagem de programação fechado. No Brasil, somente é realizada a montagem desses equipamentos. Essa ausência de criação dessas ECUs no mercado nacional traz defasagem tecnológica, além da dificuldade de manutenções e novos desenvolvimentos.

Esse fato junto com a complexidade citada do projeto de uma ECU leva ao interesse do estudo de novos modelos de desenvolvimentos abertos e principalmente compatíveis com mercado nacional, que possui discreta utilização.

A determinação do *hardware* de ECU deve considerar os requisitos necessários tanto de operação quanto de suporte à metodologia e ferramentas propostos, neste caso, a escolha do microcontrolador utilizado no projeto possui grande importância, pois, deve ser analisado se o modelo escolhido possui suporte a ferramentas computacionais como *Matlab*[®], *Simulink*[®]

e *Stateflow*[®], softwares da empresa *MathWorks*[®], tipicamente utilizadas para soluções de projetos utilizando *Model Based Design* (MBD).

Entretanto, para este projeto buscou-se escolher um microcontrolador de baixo custo, o qual possuísse bibliotecas destes softwares, que possibilitassem o desenvolvimento das soluções baseadas em diagramas de estado e ainda a possibilidade de geração automática de código (firmware) a ser embarcado. Embora a escolha do microcontrolador tenha se devido a esta compatibilidade e facilidade de acesso às ferramentas e custo, deve ficar claro que o objetivo desta dissertação é apresentar e detalhar a viabilidade de utilização da metodologia em questão para a área da agricultura, e que, para um projeto final, a escolha de um microcontrolador com requisitos automotivos/industriais mais adequado deva ser escolhido.

2.4. Sistemas de Comunicação: *Controller Area Network* (CAN), *Local Interconnect Network* (LIN) e *FlexRay*

Nos dias de hoje, um sistema automotivo é um sistema computacional distribuído complexo com várias exigências em nível de redes de comunicação. Grande parte dos fabricantes partilham as mesmas empresas subcontratadas. Com as tecnologias modernas aplicadas à indústria automóvel, o número de empresas que fabricam estes equipamentos aumenta, daí a necessidade de interação. Uma aplicação automotiva consiste em uma ou mais ECUs. Por exemplo, num sistema automotivo constituído por diversas aplicações, com mais de 70 ECUs, pode ser necessário distribuir mais de 2500 sinais, tornando o sistema complexo ao nível de rede de dados (MENDES; SANTOS, 2007).

Tendo em vista esse cenário, iniciou-se o desenvolvimento do protocolo serial CAN, e teve ligação direta com a indústria automotiva, tendo em vista que, até o final dos anos 80, os protocolos não cumpriam os requisitos almejados pelos engenheiros por causa de sua arquitetura distribuída. O CAN foi desenvolvido pela empresa de Robert Bosch no final dos anos 90 e, em 2003, foi padronizado pela ISO (*International Organization for Standardization*) com o standard ISO 11898 (PEREIRA; ZEFERINO, 2008).

O padrão ISO 11898 especifica as duas camadas inferiores do CAN, correspondentes ao modelo de referência ISO/OSI (*Open Systems Interconnection*) física e de enlace. As camadas superiores são dependentes da aplicação.

CAN é uma rede de protocolos de comunicação serial com a capacidade de transferir dados em velocidades de até 1Mbit/s (BOSCH, 1991). O CAN 2.0B permite a transmissão de mensagens priorizadas entre nós ou ECUs em um sistema multi-mestre. Este sistema permite que qualquer ECU transmita uma mensagem enquanto o barramento estiver livre.

O barramento CAN usa uma camada física composta por um par trançado blindado, sistema de dois fios; *CAN High* (CAN_H) e *CAN Low* (CAN_L) (Bell, 2002). CAN é um sistema de 5V (tensão contínua), onde CAN_H e CAN_L ficam ociosos a 2,5 V, e quando uma mensagem é transmitida, CAN_H aumenta para 5V e CAN_L cai para 0 V (Bell, 2002), produzindo um diferencial de 5 V para criar uma raiz quadrada de um certo tamanho e tempo para indicar uma mensagem e as informações pertinentes dentro dessa mensagem (PIRES, 2005).

A rede CAN utiliza comunicação baseada em eventos. O sincronismo ocorre a cada início da mensagem enviada no barramento. O que torna o CAN ideal para sistemas distribuídos de tempo real é a previsibilidade temporal dos eventos no barramento. Uma mensagem é enviada quando obtiver a maior prioridade no barramento em relação às outras mensagens (GUIMARÃES, 2003).

O número de elementos num sistema CAN está, teoricamente, limitado pelo número possível de identificadores diferentes. Esse número limite é, contudo, significativamente reduzido por limitações físicas do hardware. Existem no mercado de circuitos integrados *transceivers* que permitem ligar pelo menos 110 nodos e, utilizando módulos de E/S adequados, é possível ter diversos sensores e atuadores por nodo. Outra característica importante é o fato do controlador CAN de cada nó registrar os erros, avaliando-os estatisticamente, de forma a desencadear ações a eles relacionadas. Essas ações podem corresponder ao desligar, ou não, da estação que provoca os erros, tornando este protocolo eficaz em ambientes ruidosos (WATANABE, 2006).

Esse padrão possui utilização em diversas áreas da engenharia e robótica, e também auxilia na interconexão entre dispositivos de automação e controle em máquinas agrícolas e viabiliza a implantação de sistemas distribuídos. Tal protocolo foi adotado compondo o padrão internacional da ISO para aplicações em máquinas e implementos agrícolas, denominado ISO 11783, e também conhecido atualmente na indústria de máquinas agrícolas como ISOBUS.

O propósito dessa norma é prover um padrão aberto para interconexão de sistemas eletrônicos embarcáveis através de um barramento, que 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.

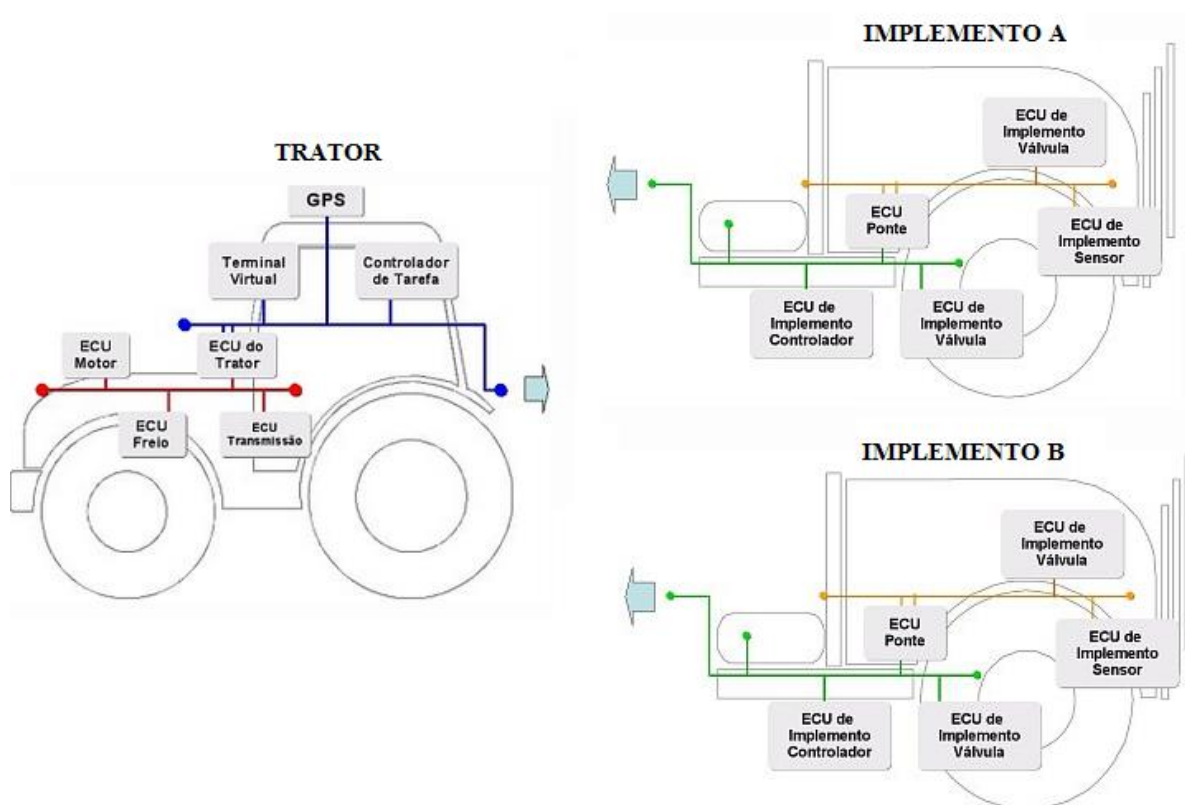
Um sistema de automação ISOBUS compatível precisa, obrigatoriamente, ser desenvolvido com funcionalidades de comunicação e integração de mensagens entre todos os elementos instalados na rede de comunicação (do trator). A Figura 13, apresenta os elementos

de uma rede ISOBUS, uma rede de comunicação padronizada que possibilita o uso de implementos de diferentes fabricantes compartilhando o mesmo recurso, em um trator.

Pode-se destacar que, dentro do trator ilustrado na Figura 13, existe apenas um conector que é utilizado com todos os implementos conectados no barramento de comunicação. Sendo assim, cada implemento (Implemento A ou B) pode compartilhar o mesmo recurso de tela, antena GPS e sensores da máquina, e implementam apenas as funcionalidades da operação que serão controladas no campo (SOUSA et al., 2007).

Na Figura 13 notam-se 4 cores de barramentos diferentes, as cores ilustram que os barramentos, neste exemplo, representam as sub-redes do sistema. Por exemplo, no barramento de cor vermelho estão as centrais que controlam os aspectos automotivos do trator (freio, transmissão, motor).

Figura 13 - Ilustração dos elementos de uma rede ISOBUS



Fonte: Adaptado de SOUSA, R. et al, 2007.

Outro padrão criado com o intuito da melhoria da comunicação entre ECUs foi o protocolo LIN. Nos anos 90, foi especificado um protocolo padrão de comunicação serial, pelo LIN Consortium, o qual era formado por cinco indústrias automobilísticas Europeias, pela Motorola e pelo grupo Volcano (GUIMARÃES, 2007).

A rede LIN é relativamente barata e de fácil implementação, permitindo obter velocidades de transmissão na ordem dos 20 KB/s (Kilo Bytes por segundo). A rede LIN é do tipo “*time-triggered*” conduzida pelo tempo, pois esta atualiza o estado da rede a uma dada taxa temporal (*master/slave*). Nessa rede apenas o nó mestre pode transmitir o cabeçalho da mensagem e somente um nó escravo devem responder a este cabeçalho. O cabeçalho é composto pelo sinal de parada (*break*), seguido pelo campo de sincronização e pelo campo do identificador. O escravo responde enviando o campo de dados.

O nó escravo executa apenas a tarefa escrava (*slave task*), mas o nó mestre executa a tarefa escrava e a tarefa mestre (*master task*). A tarefa mestre é responsável por gerar a tabela de escalonamento das mensagens e por produzir o cabeçalho do frame. A tarefa escrava é responsável por responder ao cabeçalho do frame e de repassar as mensagens recebidas para a camada de aplicação (ASSIS, 2011).

Esta rede é geralmente utilizada em chassis e em subsistemas de conforto do automóvel para controlar dispositivos como, bancos eléctricos, sensores de luz, e de climatização. Esses subsistemas são depois interligados usando normalmente a rede CAN através de uma porta LIN/CAN. A rede LIN é muitas vezes usada como uma sub-rede da rede CAN, devido à sua simplicidade e baixo custo, oferecendo um bom desempenho nas comunicações com subsistemas que não estejam relacionados com a segurança do automóvel (MENDES; SANTOS, 2007).

O LIN é um barramento de muitos escravos de um único mestre que se comunica através de um único fio, reduzindo a complexidade de cabeamento, bem como de custo. Como esse protocolo é auto sincronizado, ele permite que os nós escravos sejam executados a partir de um oscilador RC de baixo custo. LIN e CAN não competem uns com os outros, mas sim complementam um ao outro. Por um lado, o CAN atende às necessidades de alta velocidade, sensíveis a erros e opera em um barramento diferencial de 5 Volts. LIN, no entanto, atende aos requisitos de baixa velocidade e baixa largura de banda em um barramento de um único cabo de 12 Volts (POGGETTO, 2009).

O custo final de uma sub-rede empregando LIN é entre duas ou três vezes menor que a de uma sub-rede que emprega somente CAN, o que faz dessa associação uma opção atrativa para introduzir itens adicionais ao automóvel, como novos sistemas de conforto e de iluminação de automóveis. Outro fator interessante é a gama de soluções prontas para viabilizar o desenvolvimento rápido de nodos baseados no LIN, o que viabiliza reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento (PEREIRA; ZEFERINO, 2008).

Outro sistema de comunicação é o *FlexRay*, este sistema foi desenvolvido para aplicações de alto desempenho, com dois canais de transmissão para haver possibilidade de redundância e garantir robustez e segurança para eventuais problemas, como por exemplo um fio cortado. Com 10 Mbps (Megabit por Segundo) de *throughput* (banda) por canal pode ser utilizado em carros trabalhando em conjunto com sistemas CAN e LIN (FROLICH et al., 2008).

O protocolo *FlexRay* é uma arquitetura eletrônica aberta, comum e escalável para aplicações automotivas. Esse sistema pode ser operado no modo de canal único ou no modo com dois canais, fornecendo, assim, redundância quando necessário. O *FlexRay* permite transmissão de dados síncronos e de dados assíncronos. Através da transmissão síncrona, outros nós na rede recebem mensagens orientadas por tempo (*time-triggered*) em um tempo de latência predefinido; através da transmissão assíncrona, as mensagens chegam a seus destinos de forma mais rápida ou mais devagar, dependendo da prioridade atribuída a elas (*event-triggered*) (RESENDE; BORELLI, 2007).

Neste projeto utilizou-se a rede de comunicação CAN, a escolha se deve pelas limitações da rede LIN, vista como uma sub-rede da rede CAN (FROLICH et al., 2008) e pelo alto custo da rede *FlexRay*. Outro fator a favor da rede CAN é a utilização dela por projetos em fabricantes de máquinas e implementos agrícolas, como *John Deere* e *AGCO* (AEF, 2017).

2.5. Metodologia de Desenvolvimento Baseado em Modelos (MBD)

A Metodologia de Desenvolvimento Baseado em Modelos, vem do termo em inglês *Model-Based Design* (MBD), tem sido um tópico de discussão durante décadas, mas só nos últimos anos evoluiu para um fluxo de design completo, desde a criação do modelo até a implementação completa (FREDERIKSEN, 2013). Surgiu para ser uma melhoria ao modelo de desenvolvimento de software tradicional, trazendo benefícios em relação ao mesmo que estão relatados ao seguir.

Processos que utilizam a modelagem e simulação são frequentemente utilizados no desenvolvimento de sistemas complexos, possibilitando uma redução na quantidade de testes realizados em protótipos, que podem possuir custo elevado, e também são utilizados com intuito de aperfeiçoar as fases de desenvolvimento de todo o processo.

Para Ferraz (2010), modelos podem ser definidos como uma simulação computacional que modelam o comportamento de algum sistema real ou imaginário, ao longo do tempo. Tais

simulações são amplamente utilizadas para análise de sistemas, como controle de tráfego aéreo, redes de comunicação, processos físicos e no desenvolvimento do projeto de sistemas em geral.

Segundo Stella (2015), a principal característica e vantagem do processo de desenvolvimento baseado em modelo é o desenvolvimento em uma única plataforma, permitindo que se crie a planta do sistema desejado e seu controlador utilizando a mesma ferramenta computacional. Isso facilita a visualização e o entendimento do sistema assim como possíveis erros. O resultado é um sistema funcional e de fácil verificação, diminuindo significativamente a possibilidade de que os componentes individuais não se encaixem de maneira otimizada.

Levando em consideração outras metodologias de desenvolvimento tradicionais, pode-se citar algumas vantagens do desenvolvimento com MBD. Segundo Fantuzzi (2014), são:

- a) Possibilidade de desenvolvimento em um ambiente de projeto comum, com isto facilitando a comunicação, análise de dados e verificação do sistema entre todos os envolvidos no desenvolvimento;
- b) Erros podem ser localizados e corrigidos no início do projeto, quando ainda o tempo e custo para algumas modificações são pequenas;
- c) Foco na reutilização de projetos para atualizações de sistema ou para sistemas derivativos.

Na Figura 14, é apresentado o processo de desenvolvimento de software tradicional e suas principais dificuldades. Na parte de requisitos e informações, no processo tradicional são realizados os passos de definição dos requisitos geralmente em forma de texto, com isso impedindo uma integração rápida com as outras etapas do processo. Na parte do desenvolvimento do protótipo físico e o desenvolvimento das linguagens geralmente são realizados em tecnologias de domínio específico, com isto impedindo a realização de testes até a fase de implementação do software ou hardware, aumentando a probabilidade de falhas humanas e número de horas em caso de correções durante o projeto (NEME, 2014).

Deve-se citar também que o processo de embarcar e os testes no modelo tradicional necessitam de muitos ajustes manuais, resultando em um processo complexo e maçante, além dos erros, que nesta estratégia são localizados de maneira tardia no processo.

Figura 14 - Metodologia de desenvolvimento de software embarcado automotivo tradicional



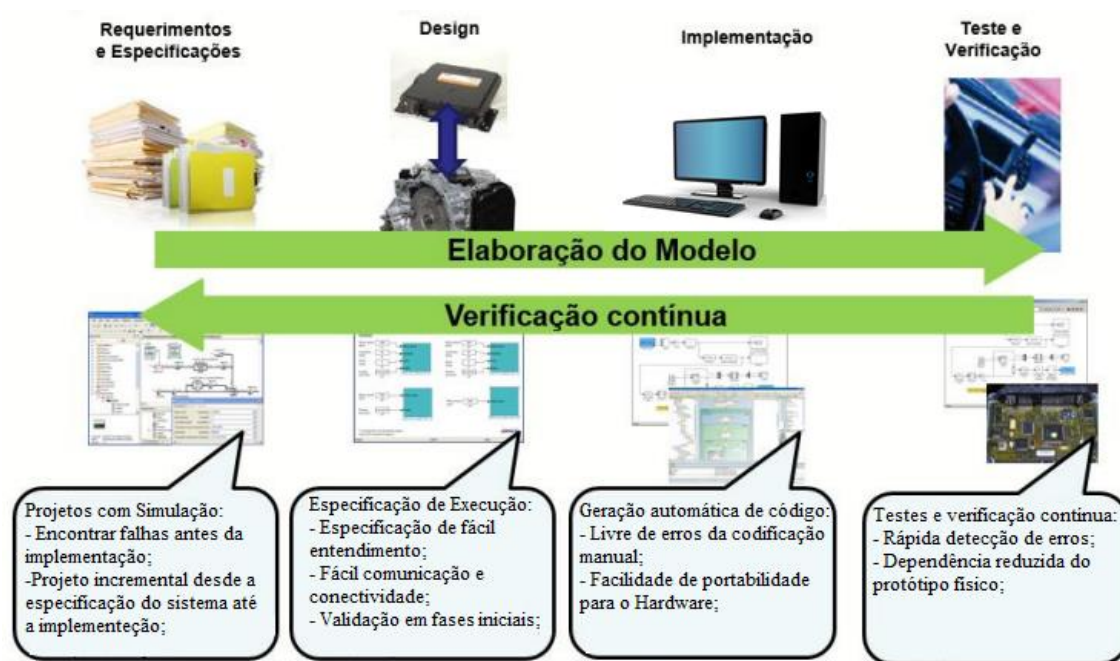
Fonte: Adaptado de Neme (2014).

No desenvolvimento com o MBD os requisitos são criados em um modelo executável, disponível a todos os envolvidos de maneira fácil, com isto facilitando a interação e fornecendo maior riqueza de detalhes ao projeto. A utilização das ferramentas computacionais é de melhor maneira integrada, podendo simular o sistema durante o desenvolvimento, assim pode-se identificar e corrigir as falhas antes do processo de implementação.

A Figura 15 apresenta o fluxo de trabalho com o MBD, ilustrando as melhorias que esta metodologia traz em relação ao modelo tradicional. Na etapa de Requerimentos e Especificações pode-se relatar com o MBD a possibilidade de encontrar falhas antes da implementação do software e do projeto ser incremental desde seu início, facilitando correções. No Desenvolvimento a especificação é visual e de fácil entendimento, possibilitando validações em fases iniciais do projeto, não sendo necessário esperar até o final do projeto para testar (STELLA, 2015).

Na etapa da implementação, tem-se a facilidade de geração automática de código de linguagem de programação pelo software, diminuindo a possibilidade de falhas manuais e geração de códigos que utilizem muito do hardware para sua execução. Na etapa de testes e verificação contínua o MBD possibilita uma rápida detecção de erros e realização de testes no próprio software através de planta virtual.

Figura 15 - Metodologia de desenvolvimento baseado em modelos (MBD) para software embarcado automotivo



Fonte: Adaptado de Stella (2015).

Parte importante no desenvolvimento do MBD é a escolha do software a ser utilizado para o desenvolvimento do processo, este software deve possuir compatibilidade com todas as fases do MBD ou fácil suporte para ser incorporado a outros softwares, com isso, preservando os conceitos que o MBD visa trazer em termos de diminuição do tempo do projeto.

Para esse projeto utilizaram-se os softwares da fabricante de softwares *MathWorks*[®], sendo com maior utilização os softwares *Matlab*[®], *Simulink*[®], *Stateflow*[®]. O *Stateflow*[®] é um ambiente de simulação de decisões combinacionais e sequenciais baseadas em máquinas de estados e fluxogramas.

O software *Matlab*[®] é utilizado em larga escala para aplicar o MBD em diversos ramos da engenharia. Segundo dados do ranking de linguagens de programação mais utilizadas no mundo do ano de 2015, fornecido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), a linguagem de programação do *Matlab*[®] é uma das 10 mais utilizadas (IEEE, 2015).

Neste trabalho as ferramentas foram escolhidas pelo suporte que fornecem a esse tipo de atividade e por possuírem troca de informações entre eles, como exemplo: um modelo gerado em um dos softwares pode ser importado ou gerar funções próprias para outro software.

A metodologia é aplicada através de etapas, nas quais são utilizadas as técnicas *Model-in-the-Loop* (MIL), *Software-in-the-Loop* (SIL), *Processor-in-the-Loop* (PIL) e *Hardware-in-the-Loop* (HIL). Seguem as definições sobre as etapas:

a) *Model-in-the-Loop* (MIL): É o primeiro passo do projeto de sistema embarcado e consiste no projeto da função, esta etapa serve como referência aos demais passos. Nesse modelo estão contidos os valores mínimos e máximos das variáveis. É feita a estratégia de controle através de software, neste trabalho utilizou-se o software *Matlab/Simulink*[®] e *Stateflow*[®].

b) *Software-in-the-Loop* (SIL): É onde a ferramenta de geração de código fornece a linguagem em C ou C++ a partir da função de controle. Com as simulações da programação, o modelo de controle já pode ser analisado de maneira mais próximo da realidade.

c) *Processor-in-the-Loop* (PIL): É onde se executa o código gerado em um microcontrolador, porém a planta física está representada em um diagrama do software. Nesse estágio, as principais tarefas envolvem medição de memória, tempo de execução e verificação do código.

d) *Hardware-in-the-Loop* (HIL): Nesta etapa o sistema de controle está instalado no sistema final de controle, e pode apenas interagir com a planta através das entradas apropriadas do controlador. A planta está sendo executada em um computador em tempo real com entradas e saídas simuladas para fazer com que o controlador acredite que está instalado na planta real. Nesse caso, a única diferença entre a aplicação final e o ambiente HIL é a fidelidade do modelo da planta e os vetores teste que estão sendo utilizados.

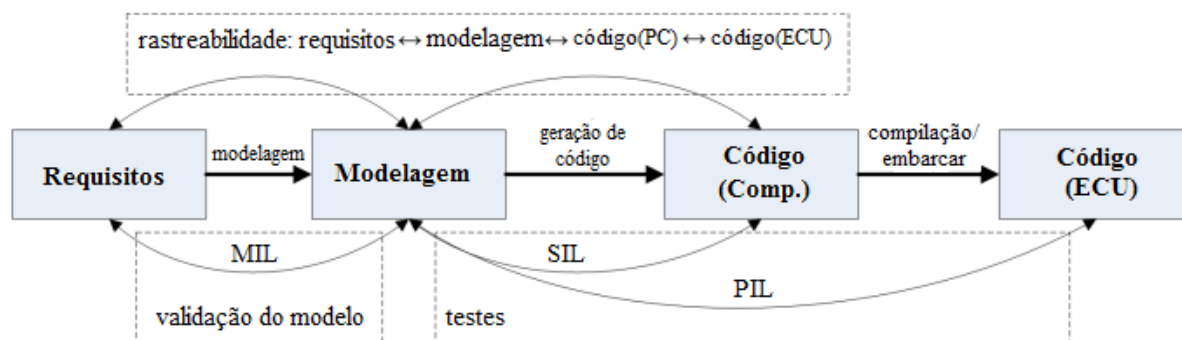
Das fases do MDB citadas, neste trabalho utilizaram-se as fases: *Model-in-the-Loop* (MIL), *Software-in-the-Loop* (SIL), *Processor-in-the-Loop* (PIL). A fase *Hardware-in-the-Loop* (HIL) não faz parte do escopo do trabalho, não se possui hardware disponível para a realização desta etapa (Unidade de Controle Eletrônico - ECU e Planta Física). Segue a descrição do processo do MBD.

O processo MBD utilizado neste trabalho é ilustrado na Figura 16, inicia-se com a formalização de requisitos, prossegue com a modelagem, passa para a geração de código de linguagem de programação de forma automática no software e embarcação do código de linguagem de na ECU. Deve ser assegurada a rastreabilidade bidirecional entre vários artefatos de desenvolvimento, desde requisitos até modelos e na validação dos testes.

Os testes são executados também ao longo do desenvolvimento: o modelo é verificado contra requisitos enquanto o código de linguagem é executado no *software* que simula a

planta física e é verificado em relação ao modelo. Além disso, as validações e testes prosseguem com uma contínua verificação em todo o processo.

Figura 16 - Ilustração das fases do MBD utilizados neste trabalho



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

Pode-se encontrar a utilização da metodologia MBD com maior frequência na indústria automobilística. Nacionalmente cita-se Neme (2014), que seguiu fluxo de trabalho semelhante ao utilizado neste trabalho para o estudo em torno do controle de iluminação externa de um veículo; no trabalho de Silva (2014), o MBD é utilizado para o desenvolvimento de um software automotivo embarcado utilizando o padrão AUTOSAR (*Automotive Open System Architectur*), que é um padrão aberto criado visando facilitar o desenvolvimento nesta área.

Ainda nacionalmente cita-se Stella (2015), que desenvolveu uma estratégia de controle baseada em eventos para o sistema de iluminação externa e painel de instrumentos automotivo, para isto foram utilizados os softwares *Simulink*[®] e *Stateflow*[®] que fazem parte deste trabalho.

Em estudos internacionais cita-se Ord (2014) que fez o projeto de um conjunto de motor e transmissão utilizando conceitos da metodologia MBD e relata que a modelagem e a simulação da metodologia são comprovadas como uma ferramenta inestimável que pode ser aplicada em qualquer lugar, desde o projeto preliminar até a validação do software; Shang et al. (2013) fez um estudo de caso para demonstrar o projeto sistemático, análise e avaliação de um sistema integrado de controle automotivo, o fluxo de trabalho inicial é semelhante a este trabalho.

Analizando outras áreas da engenharia, cita-se o estudo de Reedy, J. e Lunzman, S. (2010), que aplicaram o MBD para o desenvolvimento dos controles mecânicos de uma locomotiva. Esse estudo demonstra a aplicação em um sistema complexo, uma máquina com

vários módulos de controle eletrônico executando algoritmos integrados visando maximizar o desempenho da máquina e eficiência de combustível.

Para a área da agricultura e de máquinas agrícolas encontram-se poucos estudos aplicando o desenvolvimento em MBD. Em Wett et al. (2006) foi desenvolvido um padrão de projetos envolvendo a digestão de biogás utilizando algumas premissas do MBD. No caso de Jian-Jun (2012) são utilizados alguns conceitos de MBD para a modelagem de um motor conceitual de uma máquina agrícola e Yoo et al. (2013), aplicou a metodologia MBD para o sistema de acionamento e condução de um trator elétrico, utilizando-se também para seu desenvolvimento do software *Simulink*[®].

Nota-se que a aplicação do desenvolvimento em MBD em máquinas agrícolas possui poucas referências internacionalmente, e a utilização nacionalmente é pequena, tornando este estudo interessante regionalmente e nacionalmente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção apresentam-se os materiais e procedimentos utilizados para o desenvolvimento do projeto. Em materiais inicia-se com a determinação dos requisitos dos sensores utilizados no trabalho, segue para a descrição do hardware do sistema embarcado utilizado no projeto e finaliza com a descrição dos softwares utilizados o desenvolvimento do projeto baseado em modelo. Em métodos consta a descrição dos procedimentos utilizados e finaliza-se com o detalhamento dos processos para a validação.

3.1. Materiais

Nesta seção apresentam-se os materiais utilizados no projeto baseado em modelo para um estudo de caso de uma plantadeira. Inicia-se o descritivo dos sensores utilizados neste projeto, segue com explicação da utilização dos softwares *Matlab/Simulink*[®] e *Stateflow*[®] e finaliza com os microcontroladores utilizados nesse trabalho.

3.1.1 Sensores

Para a simulação da ECU, levou-se em consideração o princípio de funcionamento dos sensores mais comuns e utilizados por plantadeiras que são comercializadas no território nacional. A explicação do funcionamento destes sensores está na seção 2.2.2. São eles:

- Sensor de Nível de Tanque;
- Sensor de Vácuo;
- Sensor de Sementes;
- Sensor de Velocidade;
- Sensor de Rotação do Eixo;
- Sensor de Levante do Implemento; e
- Sensor de Posicionamento Global.

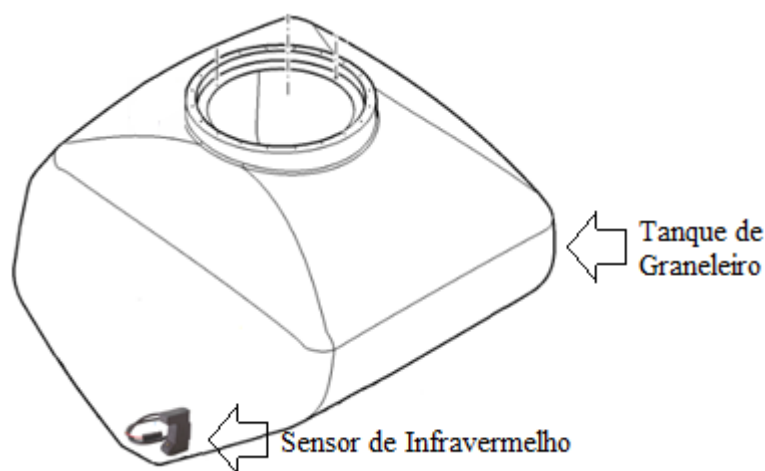
Monitorando esses sensores é possível analisar parte do funcionamento de uma plantadeira, seja em função do funcionamento de partes específicas (como o correto funcionamento de uma correia ou giro de algum eixo), seja obtendo informações obtidas através da fusão dos dados dos sensores instalados (como por exemplo, avaliação da disposição das sementes no solo).

Nesta etapa estão descritos os sensores com a definição de seus requisitos e como foram utilizados no projeto do controlador.

a) Sensor de Nível do Tanque:

No modelo proposto neste trabalho, é prevista a instalação de um sensor fotoelétrico de infravermelho por barreira na parte inferior do tanque. A parte emissora do sensor envia uma luz infravermelho e ao chegar ao receptor o sinal digital de saída é '0', em caso de encontrar um obstáculo (sementes), o sinal de saída digital é '1'. Ilustra-se na Figura 17 o tanque de graneleiro com o sensor infravermelho instalado.

Figura 17 - Ilustração de tanque do graneleiro com sensor de nível



Fonte: Adaptado de Jhon Deere (2016).

Nesta configuração com o sensor infravermelho de barreira instalado, com análise e devido tratamento do sinal de saída do sensor, pode-se verificar quando a quantidade de sementes disponíveis no tanque está com menos de 10%, com isso estimar o tempo que o implemento consegue trabalhar sem a necessidade de reabastecimento com sementes o tanque de graneleiro.

Como forma de simulação da planta física para este sensor, utilizou-se um botão, apertando-o manualmente pode-se analisar a alteração no resultado de saída, conforme status de botão não apertado '0' e botão apertado '1' através do software *Stateflow*[®]. Na Tabela 6 estão as informações técnicas sobre esse sensor infravermelho.

Tabela 6 - Informações sobre o sinal de saída do infravermelho

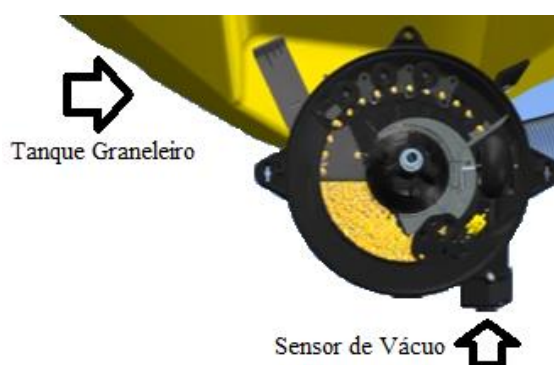
Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Digital (0 a 5V)
Range de Operação	0 a 5V

Fonte: Adaptado de AGROSYSTEM, 2017.

b) Sensor de Vácuo:

No modelo proposto neste trabalho, consta um sensor de vácuo instalado em conjunto no disco de sementes. Esse sensor mede constantemente a pressão negativa do ar, para que com a análise e tratamento do sinal de saída do sensor, o condutor na cabine do trator consiga analisar se a pressão está de acordo para que o disco de plantio funcione de maneira correta. Ilustra-se na Figura 18 a engrenagem e disco de plantio em conjunto com a localização do sensor de vácuo.

Figura 18 - Ilustração do disco de plantio com o sensor de vácuo



Fonte: Adaptado de Tempo (2015).

O sensor de vácuo (pressão negativa) utilizado neste estudo possui sua saída analógica e sua faixa de operação de leitura é entre 0 – 23,2 oz/in² (*Ounce Force per Square Inch*), com o devido tratamento e análise do sinal de saída desse sensor, o monitor na cabine do trator pode informar se a pressão está suficiente ou não para o funcionamento correto da engrenagem e disco de plantio (DICKY JHON, 2016).

Como forma de simulação da planta física para esse sensor, utilizou-se um potenciômetro, ajustando manualmente a limitação do fluxo de corrente do sistema entre os valores do range de operação, podendo analisar o valor de saída em tempo real no Software *Stateflow*[®]. Na Tabela 7 tem-se informações sobre o sinal de saída e range de operação do sensor de vácuo.

Tabela 7 – Informações sobre o sinal de saída do sensor de vácuo

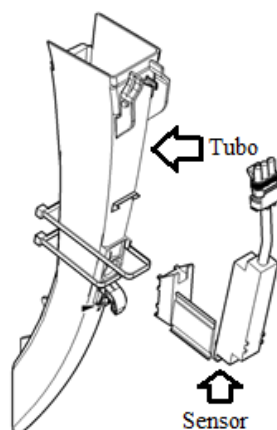
Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Analógico
Range de Operação	0 a -23,2 oz/in ²

Fonte: Adaptado de AGROSYSTEM, 2017.

c) Sensor de Sementes:

No modelo proposto neste trabalho, consta a instalação de 4 tubos de sementes, em caso de instalação em uma plantadeira com número maior de tubos, as alterações necessárias no sistema de controle são de fácil implementação. Na Figura 19 ilustra-se um tubo de sementes com o sensor acoplado.

Figura 19 – Ilustração de um tubo de sementes com sensor



Fonte: Adaptado de John Deere (2016).

O sensor de infravermelho ativo instalado no tubo possui saída digital de tipo infravermelho, de maneira que há sinal '0' quando o receptor detecta sinal do emissor e sinal '1' quando não há, neste caso quando a semente passa pelo tubo.

Através da análise da passagem da semente pelo sensor de cada tubo, com a devida análise e tratamento deste sinal, a central de controle pode calcular quantas sementes passaram por cada sensor do tubo e demonstrar um contador total. Essa informação é útil para, além da análise do funcionamento de cada tubo, em conjunto com demais sensores, como o sensor de posicionamento global, pode trazer uma análise da quantidade de sementes que foi utilizada por local na área de plantio. Essas informações podem auxiliar no planejamento do plantio das próximas safras.

Como forma de simulação da planta física para os sensores de infravermelho de tubo de sementes, em um primeiro momento, para validação, utilizou-se chaves para indicar a presença ou não da semente, e posteriormente, para teste experimental, foi utilizado um disco perfurado com velocidade controlada pelo qual, sensores de barreira identificavam o evento (obstrução ou não do receptor óptico) para contagem de eventos. Segue na Tabela 8 as informações sobre o sinal de saída e range de operação do sensor de sementes.

Tabela 8 – Informações sobre o sinal de saída do sensor de sementes

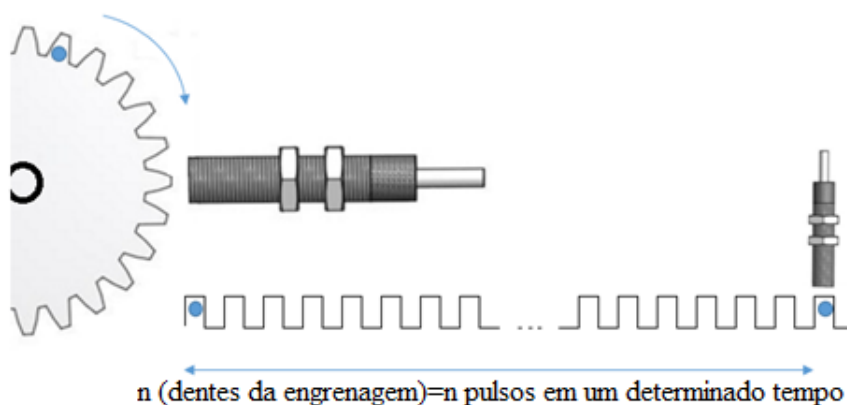
Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Digital (0 a 5V)
Range de Operação	0 a 5V

Fonte: Adaptado de AGROSYSTEM, 2017.

d) Sensor de Velocidade Indutivo:

O modelo proposto neste trabalho prevê a instalação de um sensor de velocidade indutivo. Sensores de velocidade integram detecção da velocidade de rotação e monitoramento em um aparelho. A cabeça do sensor opera segundo o princípio do sensor indutivo de proximidade. O sensor detecta superfícies metálicas atuantes em uma máquina rotativa. A avaliação integrada converte esta informação em uma velocidade de rotação. Na Figura 20 ilustra-se o funcionamento do sensor indutivo para medida de velocidade, demonstrando que o sinal de saída do sensor será '1' quando a superfície metálica fica próxima do sensor. A partir do número de dentes da engrenagem e do número de pulsos em um determinado tempo sabe-se o número de voltas neste tempo e, portanto, a velocidade.

Figura 20 – Ilustração do funcionamento do sensor de velocidade indutivo



Fonte: Adaptado de Pedroso, 2002.

Como a velocidade tem papel importante na qualidade do semeio, a análise deste item deve ser constante para que o condutor possa manter a plantadeira em uma velocidade que permita o melhor aproveitamento das sementes. O sensor de velocidade em conjunto com outros, como o de sensor de posicionamento global e o sensor de rotação por eixo, por exemplo, podem servir de planejamento se a velocidade esteve certa durante todas as etapas e se a plantadeira está com desempenho esperado.

Apesar da saída do sensor ser digital, pelo motivo de a validação ser de forma manual, simulou-se de forma analógica, podendo ser empregada com um conversor de frequência para este sensor, como o conversor de modelo LM2907 da fabricante *Texas Instruments*®.

Simulou-se com um potenciômetro, ajustando manualmente a limitação do fluxo de corrente do sistema entre os valores do range de operação, podendo analisar em tempo real o valor de saída no Software *Stateflow*®. Mais precisamente, essa operação simulou a utilização de um conversor de frequência. Na Tabela 9 tem-se as informações sobre o sinal de saída do sensor de velocidade.

Tabela 9 – Informações sobre o sinal de saída do sensor de velocidade indutivo

Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Digital
Range de Operação	0 a 5V

Fonte: Adaptado de AGROSYSTEM, 2017.

e) Sensor de Rotação do Eixo:

No modelo proposto neste trabalho, prevê a instalação de um sensor de rotação do eixo instalado no eixo de controle da plantadeira e não nas rodas, local onde é geralmente instalado nas plantadeiras, conforme Figura 21.

Figura 21 – Ilustração do sensor de rotação do eixo



Fonte: John Deere (2016).

Nessa configuração pode-se analisar o funcionamento do sistema após o ajuste das correias. O sensor possui saída analógica e possui faixa de operação entre 0 e 8.000 rotações por minuto (rpm).

Apesar da saída do sensor ser digital, na simulação manual, como forma de simulação da planta física para esse sensor analisou-se de forma analógica com um potenciômetro, ajustando manualmente a limitação do fluxo de corrente do sistema entre os valores do range

de operação, podendo analisar em tempo real o valor de saída no Software *Stateflow*[®]. Mais especificamente, foi simulado o resultado de um conversor de frequência. Segue na Tabela 10 as informações sobre o sinal de saída do sensor de rotação de eixo.

Tabela 10 – Informações sobre o sinal de saída do sensor de rotação do eixo

Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Digital
Range de Operação	0 a 5V

Fonte: Adaptado de Dickey-John (2016).

f) Sensor de Levante do Implemento:

No modelo proposto neste trabalho, existe a instalação de um sensor de levante do implemento na lateral da plantadeira, em estrutura próxima as rodas. A posição da plantadeira em relação ao solo é fator primordial para evitar o semeio em posição incorreta do solo, podendo acarretar em perda de produção. Na Figura 22 ilustra-se um sensor de levante de implemento compatível com diversos modelos de plantadeira.

O sensor instalado é um sensor com sinal de saída digital, e em condição normal seu sinal de saída é '0' e quando o implemento estiver com inclinação elevada o cabo é tensionado alterando o sinal de saída para sinal '1'.

Figura 22 – Ilustração de um sensor de levante do implemento



Fonte: Adaptado de AGROSYSTEM (2017).

Como forma de simulação da planta física para este sensor, utilizou-se um botão, apertando-o manualmente pode-se analisar a alteração no resultado de saída, conforme status de botão não apertado '0' e botão apertado '1' através do software *Stateflow*[®]. Na Tabela 11 estão as informações sobre o sinal de saída do sensor de levante do implemento.

Tabela 11 – Informações sobre o sinal de saída do sensor de levante do implemento

Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Digital
Range de Operação	0 a 5V

Fonte: Adaptado de AGROSYSTEM, 2017.

g) Sensor de Posicionamento Global:

No estudo proposto está prevista a instalação de um sensor de posicionamento global com módulo receptor GPS Ublox NEO-6M, conectado diretamente a um microcontrolador ATMEGA de modelo 2560. Na Figura 23 segue a imagem do sensor de posicionamento global utilizado nesta pesquisa.

Figura 23 – Sensor de posicionamento global utilizado no projeto



Das informações coletadas através do sensor de posicionamento global, utilizou-se com maior ênfase neste trabalho a velocidade. Este modelo de GPS funciona através do protocolo NMEA e o cabeçalho utilizado nesse projeto foi o \$GPRMC. Segue um exemplo de dados deste cabeçalho, e na Tabela 12 os campos de dados que correspondem ao protocolo de informações conforme exemplo:

\$GPRMC,220516,A,5133.82,N,00042.24,W,173.8,231.8,130694,004.2,W*70

Tabela 12 – Descrição dos campos do cabeçalho NMEA - \$GPRMC

Exemplo	Descrição Campo
220516	Horário (HHMMSS)
A	Validade (A- OK V- Inválido)
5133.82	Latitude
N	N-Norte/Sul-S
00042.24	Longitude
W	W-Oeste/E-Leste
173.8	Velocidade em Milhas Náuticas
231.8	Curso em Graus
130616	Data (DDMMAA)
004.2	Declinação Magnética em Graus
W	W-Oeste E-Leste
*70	Verificador (<i>Cheksum</i>)

Fonte: Adaptado de Glenn Baddeley, 2001.

A forma de validação deste sensor foi a demonstração de seu funcionamento de forma correta, com a coleta dos dados selecionados do sensor através de código de linguagem executando no microcontrolador conectado diretamente no sensor GPS, enviando os dados através da porta serial para o microcontrolador que está executando a simulação da ECU e a exibição dos valores no software *Stateflow*[®] e comparação de seus valores com dados de um sensor de posicionamento geográfico de um celular de marca Motorola de modelo G5. Na Tabela 13 estão as informações técnicas sobre o sensor de posicionamento global;

Tabela 13 – Informações técnicas sobre o sensor de posicionamento global

Descrição	Tipo Sinal
Sinal de Saída	Digital
Tempo para Primeira Leitura	26 s
Possível Erro Horizontal	Até 2,5 m
Tipo de Saída para o Sistema	Serial
Taxa de Leitura Serial Utilizado	9800 bits/s
Atualização	1 s

Fonte: Adaptado de *Datasheet* Ublox NEO-6M.

3.1.2 Softwares *Matlab/Simulink*[®] e *Stateflow*[®]

Em grande parte do projeto utilizaram-se os softwares *Matlab*[®], *Simulink*[®] e *Stateflow*[®] da fabricante de software *MathWorks*[®]. *Matlab*[®] é uma linguagem de alto desempenho para computação técnica. Integra a computação, a visualização e a programação de forma fácil de usa, em um ambiente em que os problemas e as soluções são expressos em notação matemática. A suíte de software *Matlab*[®] possui uma variedade de aplicações para

diversos ramos da engenharia, uma delas é o *Simulink*[®], que é um ambiente de diagrama de blocos para simulação e baseado em modelos (MATWORKS, 2005).

Em conjunto com o *Simulink*[®], o *Stateflow*[®] é uma ferramenta gráfica de design e desenvolvimento para controle e lógica de supervisão. O *Stateflow*[®] fornece descrições claras e concisas do comportamento complexo do sistema usando a teoria das máquinas de estados finitos, as notações do diagrama de fluxo e os diagramas de transição do estado todos no mesmo diagrama de fluxo de estados (MATHWORKS, 2002).

O processo de desenvolvimento baseado em máquinas de estado baseia-se no processamento de um fluxo de informações em um determinado período, neste trabalho chamado de tempo de execução. A animação de máquinas de estado e as verificações estáticas e de tempo de execução podem testar a consistência e a integridade do projeto antes da implementação (MATHWORKS, 2005).

A escolha por esses softwares se deve pela utilização em larga escala pela aplicação do MBD em diversos ramos da engenharia. Os softwares suportam o design do sistema, simulação, geração automática de código e teste e verificação contínua de sistemas incorporados. Fornecem um editor gráfico, bibliotecas de blocos personalizáveis e solucionadores para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos.

Outro fator de escolha foi a compatibilidade dos softwares com o microcontrolador utilizado, gerando os códigos de linguagem de programação e realizando a importação no microcontrolador de forma automática.

Utilizou-se neste projeto a versão do *Matlab*[®] R2017a (9.2.0.538062), dos softwares *Simulink*[®] e *Stateflow*[®] utilizou-se a versão 8.9 (R2017a), nos 3 casos utilizou-se versão para sistema operacional Windows[®] 64 Bits. Utilizou-se os pacotes de expansão chamados *Simulink Support Package for Arduino Hardware* e *Simulink Support Package for BeagleBone Hardware*, estes pacotes habilitam a utilização dos softwares diretamente com equipamentos com as plataformas Arduino e BeagleBone.

3.1.3 Microcontrolador

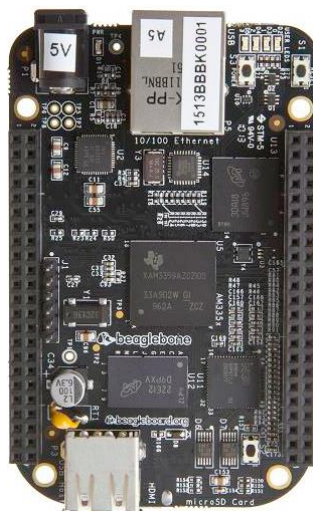
Na metodologia MBD a seleção do microcontrolador é um fator preponderante em um projeto, este deve possuir requisitos e configurações (memória, processamento, etc) que suportem a execução do software a ser simulado e não causam travamentos ou lentidão no processo. O microcontrolador deve possuir suporte ao software utilizado no desenvolvimento do projeto com a metodologia baseada em modelos, tendo isso, pode ocorrer a embarcação automática de código de linguagem de programação e demais facilidades da metodologia.

Outro fator que deve ser analisado é a forma de comunicação entre a ferramenta e o microcontrolador, necessário para a validação, e normalmente, este processo de comunicação pode limitar o desempenho do projeto. Podem ser utilizados diversos modelos de microcontroladores para um projeto, neste estudo, iniciou-se com o microcontrolador ATMEGA de modelo 2560 em uma plataforma Arduino MEGA2560 e apesar de em testes de desempenho suportar a execução da simulação em memória e processamento, pela transferência de dados entre o software e hardware ser em serial, ocasionou falhas em tempos de execução menores. Testou-se também o microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, com Arduino Due, que executou em melhor forma, porém ocasionou falhas pela transmissão serial.

Por esse motivo citado acima, o microcontrolador escolhido para o projeto para executar a simulação da ECU de uma plantadeira é o Sitara AM3359AZCZ100 de uma placa BeagleBone Black, com transferência em ethernet, que executou todo o sistema sem demonstrar falhas.

O BeagleBone Black funciona em uma plataforma Linux, com sistema operacional Debian, na versão 7.5. Este modelo é baseado no processador AM3359AZCZ100 1GHz ARM Cortex-A8, da *Texas Instruments*[®]. Conta com um acelerador gráfico 3d, memória de 512 Mb DDR3, conexão Ethernet 10/100 MB (megabyte) com alto poder de processamento segundo o fabricante (BEAGLEBOARD, 2017). Segue na Figura 24, ilustração da placa BeagleBone Black.

Figura 24 – Ilustração da placa BeagleBone Black



Fonte: Adaptado de BeagleBoard Black, 2017.

Selecionou-se esse modelo de microcontrolador pelo seu suporte as bibliotecas dos softwares *Matlab/Simulink*[®] e *Stateflow*[®], com isso, a programação é realizada de forma visual, sendo a programação efetuada e importada exclusivamente através dos softwares de apoio, assim, diminuindo a possibilidade de erros de linguagem de programação. O número de portas de entradas/saídas digitais e analógicas é compatível com o projeto e através de testes iniciais já com o projeto em desenvolvimento, o microcontrolador AM3359AZCZ100 demonstrou-se capaz de executar a simulação sem travamentos ou atrasos.

Como o software *Stateflow*[®] não possui por padrão bibliotecas prontas para o módulo do sensor de GPS utilizado (Ublox NEO-6M), utilizou-se um segundo microcontrolador com este suporte para facilitar a aquisição destes dados. Um ATMEGA de modelo 2560 em uma plataforma Arduino MEGA2560 foi utilizado para a conexão do módulo e envio das informações via porta comunicação ethernet para o microcontrolador que simula a ECU. No desenvolvimento do código de linguagem de programação para a coleta e envio das informações utilizou-se a IDE *open-source* Arduino 1.8.5, em sua versão para sistema operacional Windows[®]. A linguagem de programação utilizada foi a 'C' adaptada para microcontroladores Arduino.

3.2. Metodologia

Trata-se de um projeto que foi fundamento na metodologia MBD, aplicada para o controle de funções específicas de um implemento agrícola, neste caso, uma plantadeira, com foco no método do MBD em si e com ferramentas e materiais disponíveis.

O microcontrolador escolhido para o projeto, AM3359AZCZ100, apresenta sua versão para aplicação industrial, mas não apresenta uma versão para aplicação veicular. Isto habitualmente indica que pode haver situações onde o risco pode existir, mas em aplicações de segurança.

Como aplicou-se o microcontrolador em aplicações secundárias (Exemplo: monitoramento de nível de tanque; contagem de sementes; monitoramento de GPS, etc.), o microcontrolador atende aos requisitos necessários, mas não obstante do projeto, toda metodologia aqui abordada pode vir a ser utilizada em microcontroladores com melhores requisitos (ou com requisitos veiculares).

Inicialmente, realizou-se o estudo sobre o estado tecnológico atual de desenvolvimentos em automação e eletrônica embarcada aplicados a agricultura em máquinas

e implementos agrícolas, juntamente com a análise do estado da arte de sensores e sua expansão nestas máquinas.

Realizou-se a identificação dos sensores e das ligações eletrônicas e de dados de máquinas e implementos agrícolas, apresentados na seção 2.2.1 deste trabalho. Com a devida identificação realizada, optou-se pelo estudo de caso de uma Plantadeira para a aplicação da metodologia baseado em modelos em seus principais sensores. A opção pela plantadeira se deu por seus sensores possuírem funções, em sua maioria, focados na parte agrícola e pela possibilidade de desenvolver o projeto da ECU com grande parte dos sensores utilizados em máquinas que estão em operação atualmente.

Das fases do MDB citadas na seção 2.5 deste trabalho, seguem as utilizadas neste trabalho e sua principal função no desenvolvimento do modelo:

Na fase *Model-in-the-Loop* (MIL), realizou-se, entre outras atividades, a modelagem do controlador. Na fase *Software-in-the-Loop* (SIL), na qual, entre outras atividades, gerou-se automaticamente o código de linguagem de programação e validações e testes do modelo. Na fase *Processor-in-the-Loop* (PIL), na qual, entre outras atividades, embarcou-se o código gerado em um microcontrolador e realizou-se a validação do modelo completo. A fase *Hardware-in-the-Loop* (HIL) não faz parte do escopo do trabalho, não se possui hardware disponível para a realização desta etapa (Unidade de Controle Eletrônico - ECU e Planta Física). Segue nesta seção a descrição detalhada das etapas do projeto.

Na etapa MIL da metodologia realizou-se a modelagem do controlador, levando em consideração cada sensor, definiram-se os requisitos e entradas para cada função, de modo a simular com os sinais de saída de cada caso do sistema de controle. Como alguns desses sinais possuem seu funcionamento interligado, os sinais de entrada idealizaram-se de modo a analisar se não há nenhuma falha na parte lógica no desenvolvimento do modelo.

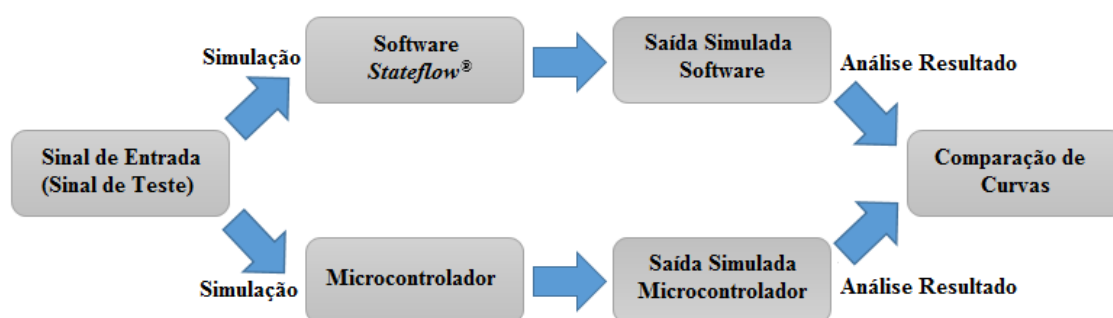
Então, iniciou-se a modelagem da planta física a ser controlada e desenvolvimento do controlador para a planta. Para tal, utilizaram-se ferramentas computacionais específicas da fabricante de softwares já descritos anteriormente: *MathWorks*[®], sendo com maior utilização os softwares *Matlab*[®], *Simulink*[®], *Stateflow*[®]. Na validação, utilizou-se a simulação para confirmar o funcionamento e validar as características.

Em seguida, na fase de SIL, utilizou-se este modelo gerado no *Simulink*[®] para gerar automaticamente o código de linguagem de programação. Para validação, aplicou-se um conjunto de entradas de para cada função e foram analisadas se as saídas eram iguais. Essa simulação realizou-se com funcionamento do código simulando a planta física no próprio software.

Na etapa PIL embarcou-se o código de linguagem gerado em um microcontrolador através dos softwares *Simulink*[®]/*Stateflow*[®]. Nesse caso para simular a ECU utilizou-se um microcontrolador AM3359AZCZ100. Como forma de realizar a simulação dos sensores, utilizarem-se botões e potenciômetros; somente no caso do sensor de posicionamento global pode-se simular com o próprio sensor.

Para auxiliar nas conexões e ligações dos sensores simulados com a placa física utilizou-se uma *protoboard* (placa de ensaio). Como forma de validação dessa etapa realizaram-se testes com todos os botões, potenciômetros e com o sensor de posicionamento global, interagindo com os mesmos e acompanhando os resultados via software *Stateflow*[®] em tempo real. Na Figura 25 ilustra-se o processo de validação utilizado no projeto para cada sensor.

Figura 25 – Ilustração do processo de validação do projeto



Para cada sensor que se aplicou a metodologia MBD da ECU realizou-se o processo de validação ilustrado na Figura 25. Gerou-se uma entrada com sinais conhecidos para testes, o mesmo sinal de entrada executou-se na planta modelada no software *Stateflow*[®] e execução no software gravado no microcontrolador de apoio. Coletaram-se a saída simulada no software e a saída simulada no microcontrolador em forma de gráfico e analisou-se se as 2 saídas continham correlação através da função ‘CORREL’ do software Excell[®], assim validando-a positivamente. Na seção Resultados seguem os gráficos para os sensores.

Para a validação de cada bloco/função isoladamente, utilizou-se um microcontrolador de forma a gerar sinais analógicos e digitais conhecidos, e assim poder avaliar os sinais obtidos pelas saídas da ECU (simulada através do software *Simulink*[®] e real, embarcada em um microcontrolador) e assim poder comparar os resultados através de correlação.

Posteriormente, desenvolveu-se uma aplicação de contagem e monitoramento de dispensação de sementes da plantadeira envolvendo sensores combinados. Neste caso, para avaliação das respostas dos dados de saída de um sensor de tubo de sementes simulado com

despejo automático e os dados do sensor de posicionamento global, com objetivo de avaliar o espaçamento do plantio de sementes e gerar informações estatísticas sobre esta operação.

Nesta avaliação prática utilizou-se um disco de madeira perfurado por 16 furos equidistantes, esse disco girou através de um motor e na base da estrutura possui um sensor óptico que monitora os furos, a exemplo de como ocorre com os sensores nos tubos de sementes. Girando o disco conseguiu-se a dinâmica de contagem das sementes e através de rotação, demonstrou-se o processo de contagem de sementes.

A avaliação realizou-se em um automóvel em movimento com velocidade próxima a de uma plantadeira em operação de plantio (de 5 a 10 km/h), em conjunto com a informação das sementes adicionalmente coletou-se os dados do sensor de GPS, valor atualizado a cada 1 segundo, para monitorar o deslocamento, e com as informações demonstrou-se o tempo e distância entre o despejo de cada semente. Como formas de validação dos dados do GPS, realizou-se a comparação com um sensor de posicionamento global de um celular de marca Motorola e modelo G5 em conjunto com o hodômetro digital do veículo durante a avaliação.

Realizaram-se 2 avaliações, a primeira com todos os furos do disco desobstruídos, demonstrando um despejo de sementes normal e em uma segunda avaliação com 1 dos furos tampando, demonstrando uma falha no despejo. Segue na Figura 26, a ilustração do disco nas 2 avaliações, na Figura 26 (a) com os furos desobstruídos e na Figura 26 (b) com 1 buraco do disco obstruído.

Figura 26 – Ilustração dos discos de sementes para a avaliação prática

a) Disco de Sementes sem Obstrução

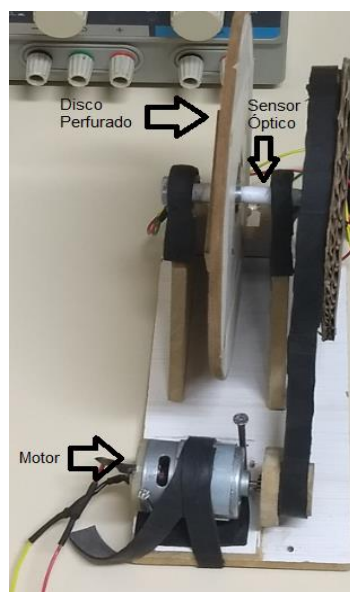


b) Disco de Sementes com 1 Obstrução



Segue na Figura 27 a ilustração do equipamento utilizado para a avaliação prática em um teste de bancada, em uma base de madeira fixou-se todo o sistema, com o motor, estrutura do disco perfurado, uma correia de borracha para limitação de velocidade e os sensores ópticos do tipo barreira.

Figura 27 – Ilustração do equipamento utilizado para a avaliação prática



Os dados do sistema foram coletados pelo microcontrolador através do firmware desenvolvido na metodologia baseada em modelos utilizando o software *Simulink*[®]/*Stateflow*[®], o qual foi embarcado na BeagleBone Black.

4. DESENVOLVIMENTO - ESTUDO DE CASO DA ECU DE UMA PLANTADEIRA

Nesta seção apresenta-se o Estudo de Caso da ECU de uma Plantadeira, inicia-se com a demonstração do modelo desenvolvido através de diagrama de blocos do software *Stateflow*® para cada sensor. Ao final, é apresentado um diagrama de blocos para uma aplicação utilizando vários sensores, com o objetivo de contagem de sementes e controle de dispensa da mesma.

4.1 Diagrama de Blocos dos Sensores da ECU

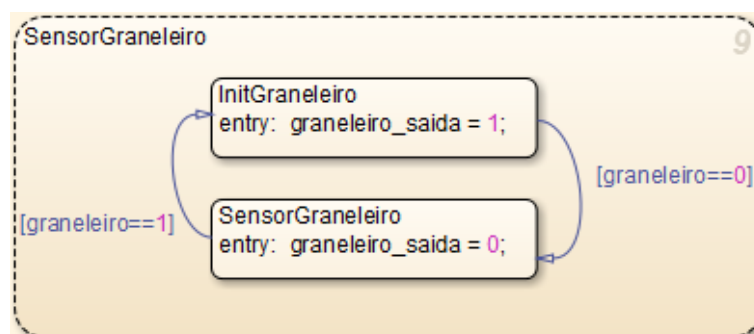
Nesta seção apresentam-se os diagramas de blocos dos sensores da ECU da plantadeira de forma separada.

Nos sensores com saídas digitais (Vácuo, Velocidade Indutivo e Rotação de Eixo), apesar da saída dos sensores ser digital, pelo motivo de a validação ser de forma manual, simulou-se de forma analógica, podendo ser empregada com um conversor de frequência para este sensor, este detalhado na seção 3.1.2. A saída analógica pode receber até 1024 sinais diferentes, por este motivo nos diagramas de estado destes sensores ocorre a divisão do sinal do sensor pela divisão de 1024 pelo valor máximo que o sensor possa chegar.

a) Sensor de Nível:

A Figura 28 ilustra o desenvolvimento do modelo proposto para o sensor do tanque do graneleiro desenvolvido no software *Stateflow*®. Nesta estrutura de ECU o sensor de nível de tanque graneleiro fica dentro de um *looping* de sensores, estes sensores são constantemente iniciados e solicitadas suas saídas.

Figura 28 – Diagrama de estados do sensor de nível



No modelo proposto, o tanque do graneleiro possui 100 centímetros de comprimento total e conforme a instalação física do sensor fotoelétrico de infravermelho e com devido

tratamento da saída do sinal digital, pode-se verificar na cabina quando o tanque estiver com quantidade menor que 10%. Na Tabela 14 pode-se verificar os sinais de entrada e saída deste sensor.

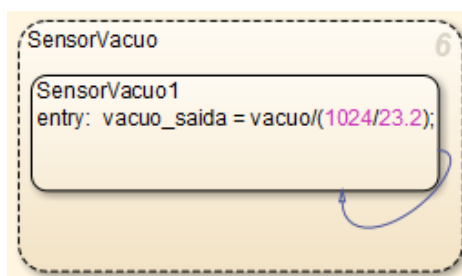
Tabela 14 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor graneleiro

Nome	Descrição	Tipo Sinal
graneleiro	Sinal de entrada do sensor do tanque de graneleiro	Entrada
graneleiro_saída	Se o tanque do graneleiro está vazio ou não	Saída

b) Sensor de Vácuo:

A Figura 29 ilustra o desenvolvimento do modelo proposto para o sensor de vácuo desenvolvido no software *Stateflow*®. O sensor de vácuo fica dentro do *looping* de sensores, e os sensores são constantemente iniciados e solicitadas suas saídas.

Figura 29 – Diagrama de estados do sensor de vácuo



Primeiramente sua variável é instanciada e faz o cálculo com o sinal recebido do sensor dividido por 1024/23,2. O sensor de vácuo proposto possui saída analógica e fornece como saída o valor da pressão do ar no intervalo de - 23,2 a 0 on/in². Na Tabela 15 pode-se avaliar o sinal de entrada e saída referente ao subsistema que controla o sensor de vácuo.

Tabela 15 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de vácuo

Nome	Descrição	Tipo Sinal
Vácuo	Sinal de entrada do sensor de vácuo	Entrada
vácuo_saída	Vácuo em <i>Ounce Force per Square Inch</i>	Saída

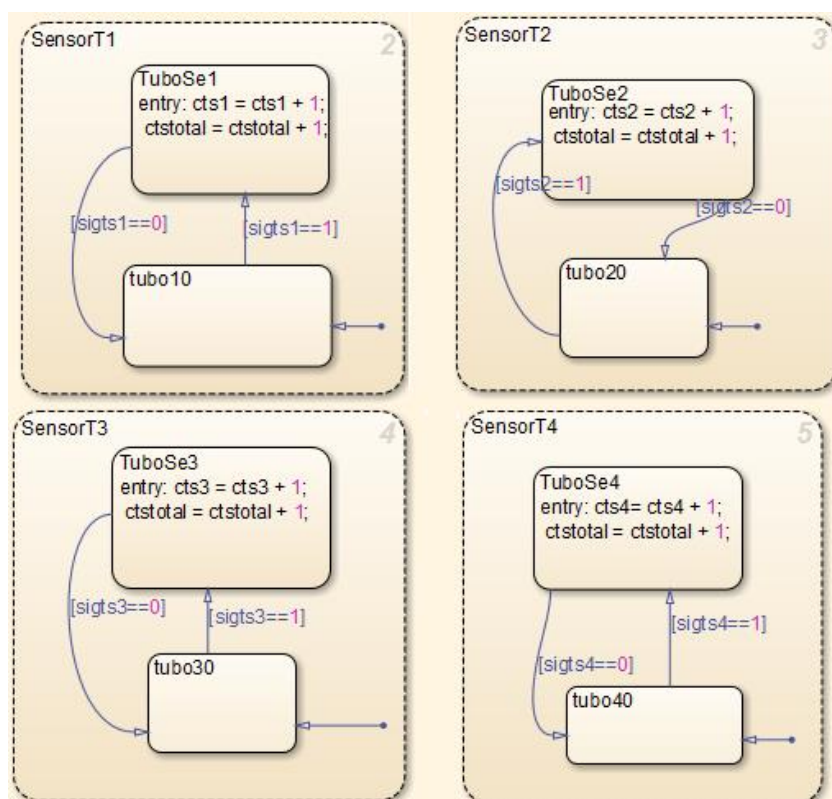
c) Sensor Sementes:

A Figura 30 ilustra o desenvolvimento do modelo proposto para os sensores de tubo de sementes desenvolvidos no software *Stateflow*®. Os sensores são iniciados com a saída igual a '0' e a ECU fará a leitura das saídas dos sensores a cada momento, conforme cada saída do sensor altere para '1', aumenta o contador daquele sensor de forma digital e incremental,

aumentando o contador global dos 4 sensores. Dessa forma o monitor da cabine pode informar ao condutor quantas sementes foram semeadas em cada tubo e um contador global de todos os tubos somados.

No teste de validação geral do projeto, utilizou-se um sensor de sementes pelo motivo de o despejo nessa avaliação ter sido realizada de forma automática.

Figura 30 – Diagrama de estados dos sensores de sementes



Na Tabela 16 pode-se avaliar o sinal de entrada e saída referente ao subsistema que controla a passagem das sementes nos tubos.

Tabela 16 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente aos sensores do tubo de sementes

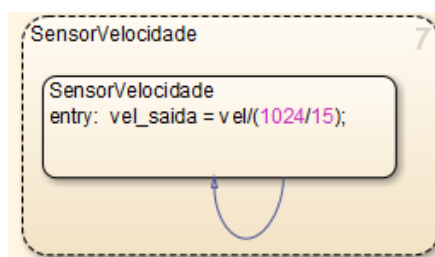
Nome	Descrição	Tipo Sinal
sigts1	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 1	Entrada
sigts2	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 2	Entrada
sigts3	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 3	Entrada
sigts4	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 4	Entrada
cts1	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 1	Saída
cts2	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 2	Saída
cts3	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 3	Saída
cts4	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 4	Saída
ctstotal	Saída do total de sementes dos 4 tubos	Saída

d) Sensor Indutivo de rotação de eixo (velocidade angular):

Uma hipótese para avaliar os sensores de rotação de eixo (velocidade angular) é contar diretamente a presença dos dentes de engrenagem e avaliar estes eventos no tempo. Outra, mais simples, é utilizar um circuito intermediário que possa converter a frequência dos pulsos lidos pelo sensor em um sinal de tensão analógico, proporcional a esta frequência. Isto pode ser facilmente obtido através da utilização de um circuito integrado como por exemplo o LM2907, que é um conversor de frequência em tensão. Esta última ideia foi a utilizada para desenvolvimento do projeto baseado em modelo do sensor de rotação de eixo (velocidade).

A Figura 31 ilustra o desenvolvimento do modelo proposto para o sensor de velocidade desenvolvido no software *Stateflow*®. O sensor está dentro do *looping* de sensores, e ocorre a divisão do sinal recebido pelo sensor pela divisão de 1024/15, com isso ocorre a conversão para que exiba para o monitor da cabine a velocidade entra 0 e 15 km/h.

Figura 31 – Diagrama de estados do sensor de velocidade



Para a validação deste sensor na planta física, utilizou-se de teste com um potenciômetro, de maneira a simular variação de velocidade 0 a 15 km/h, sendo 15 km/h a velocidade máxima que as plantadeiras em geral podem operar, e validando o resultado no software *Stateflow*®. Na Tabela 17 pode-se avaliar o sinal de entrada e saída referente ao subsistema que controla o sensor de vácuo.

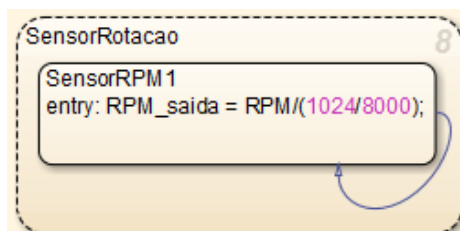
Tabela 17 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de velocidade

Nome	Descrição	Tipo Sinal
vel	Sinal de entrada do sensor de velocidade	Entrada
vel_saida	Velocidade em km/h	Saída

e) Sensor de Rotação do Eixo:

A Figura 32 ilustra o desenvolvimento do modelo proposto para o sensor de rotação do eixo desenvolvido no software *Stateflow*®. Nessa estrutura de ECU o sensor de rotação do eixo fica dentro de um *looping* de sensores, e estes sensores são constantemente iniciados e solicitadas suas saídas.

Figura 32 – Diagrama de estados do sensor de rotação



Na Tabela 18 pode-se avaliar o sinal de entrada e saída referente ao subsistema que controla o sensor de rotação.

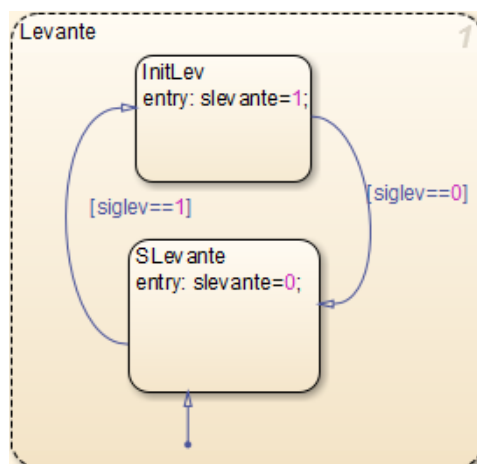
Tabela 18 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de rotação

Nome	Descrição	Tipo Sinal
RPM	Sinal de entrada do sensor de RPM	Entrada
RPM_saída	Rotação por Minuto	Saída

f) Sensor de Levante do Implemento:

A Figura 33 ilustra o desenvolvimento do modelo proposto para o sensor de levante do implemento desenvolvido no software *Stateflow*[®]. Nessa estrutura de ECU o sensor de levante de implemento fica dentro de um *looping* de sensores, e estes sensores são constantemente iniciados e solicitadas suas saídas.

Figura 33 – Diagrama de estados do sensor de levante do implemento



Na Tabela 19 pode-se avaliar o sinal de entrada e saída referente ao subsistema que controla o sensor de levante do implemento.

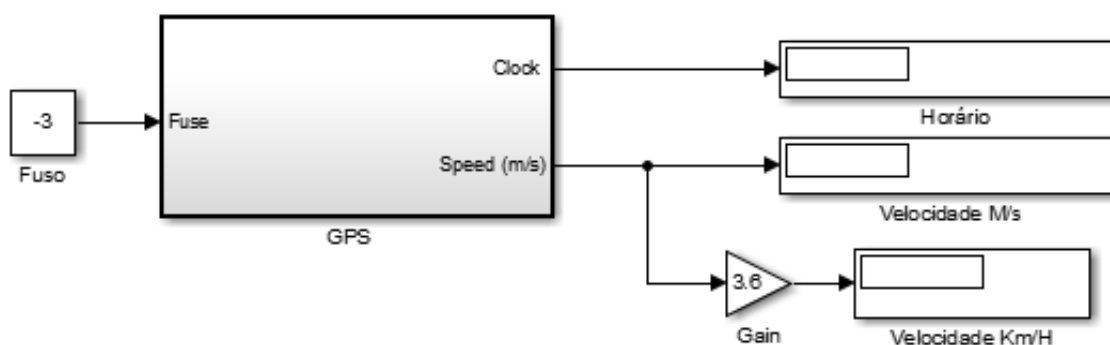
Tabela 19 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente ao sensor de levante

Nome	Descrição	Tipo Sinal
siglev	Sinal de entrada do sensor do levante	Entrada
slevant	Se o implemento está com o levante ativo	Saída

g) Sensor de Posicionamento Global:

Como o sensor de posicionamento global não possui suporte automático aos blocos do software *Stateflow*[®], os dados sobre o horário e a velocidade foram enviados via porta serial do microcontrolador. Desta forma, foi necessário a utilização de um microcontrolador próprio para a utilização do sensor de posicionamento global, além do microcontrolador que estava executando a simulação da plantadeira. Segue na Figura 34 o diagrama do controle do sensor de GPS realizado no software *Stateflow*[®].

Figura 34 – Diagrama de Controle do Sensor de Posicionamento Global



Na Figura 34 estão ilustradas as saídas dos valores de horário (Clock) e velocidade (Speed), além do fuso (-3) que corresponde ao fuso horário. A velocidade é exibida no sistema em metros por segundos (m/s) e através de multiplicação (Gain) por 3,6 é exibido em quilômetros por hora (km/h).

Para a validade deste sensor, como se trata de um sensor que estava fisicamente, realizaram-se testes em diferentes horários e testes em locomoção para averiguar o funcionamento do sensor. Os resultados foram comparados com o de um sensor de posicionamento global de um celular de marca Motorola e modelo G5. Os resultados dos 2 sensores foram próximos e dentro da taxa de erro do sensor utilizado no projeto.

4.2 Projeto de Controle de Dispensa de Sementes por MBD

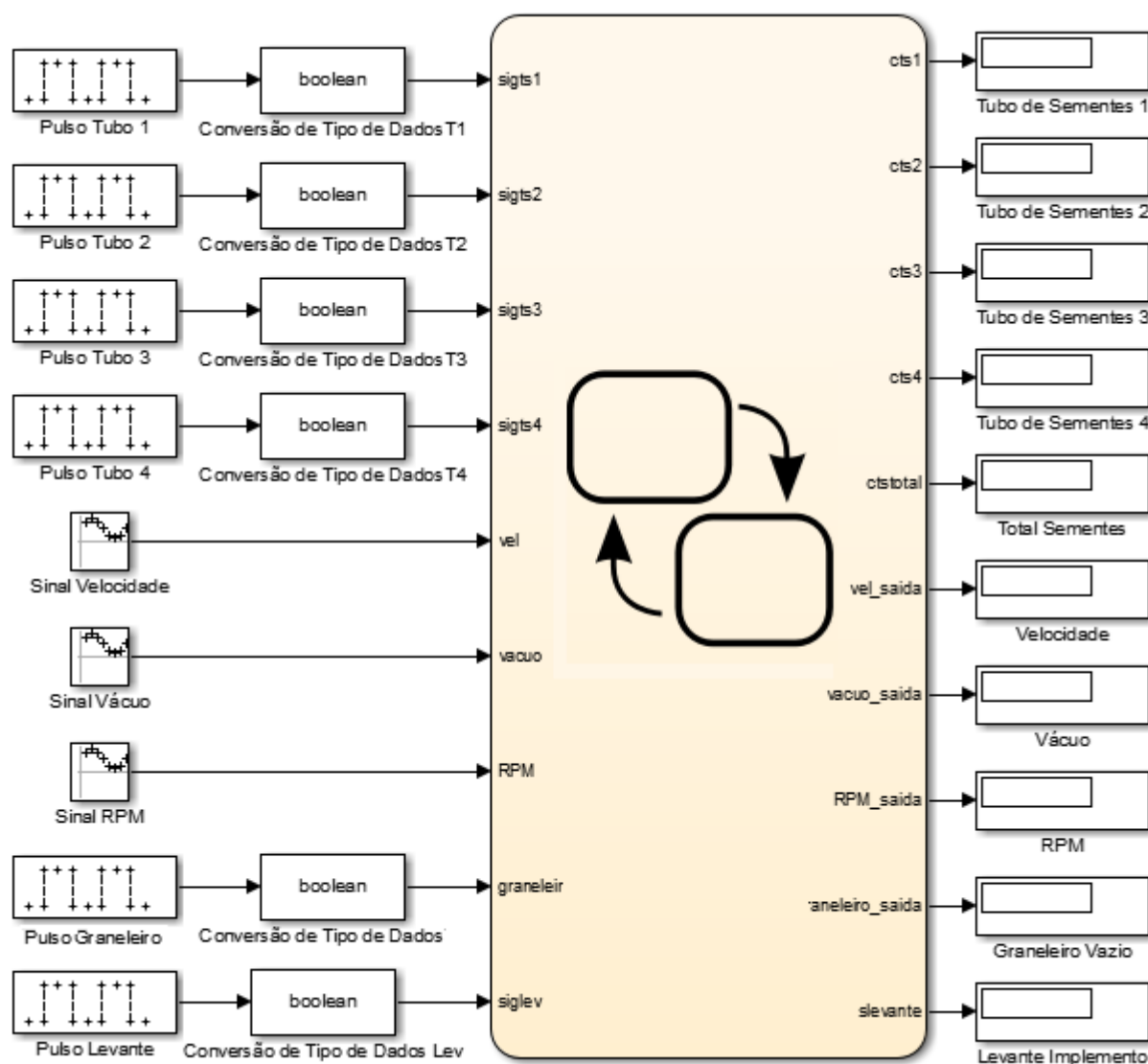
Uma vez validadas as funções de cada sensor separadamente, projetou-se uma ECU simplificada de uma plantadeira, com o objetivo de realizar o controle de dispensa de sementes, avaliando número de sementes dispensadas e distância entre as mesmas. Neste projeto, utilizaram-se os sinais de 4 sensores de tubos de sementes e os sinais do GPS para determinação de velocidade e posição.

Na Figura 35 está o diagrama principal do sistema do controle de dados, onde são mapeadas todas as entradas e saídas. A execução deste bloco principal é realizada de forma cíclica a cada 0,5ms (milissegundos). Optou-se por esse tempo através de avaliações de desempenho do sistema sendo executado pelo microcontrolador. Na Tabela 20 estão descritas as principais entradas e saídas do sistema.

Tabela 20 – Descrição das entradas/saídas de sinais referente a ECU de controle dos sensores

Nome	Descrição	Tipo Sinal
sigts1	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 1	Entrada
sigts2	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 2	Entrada
sigts3	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 3	Entrada
sigts4	Sinal de entrada do Tubo de Sementes 4	Entrada
Vel	Sinal de entrada do sensor de velocidade	Entrada
Vácuo	Sinal de entrada do sensor de vácuo	Entrada
RPM	Sinal de entrada do sensor de RPM	Entrada
Graneleiro	Sinal de entrada do sensor do tanque de graneleiro	Entrada
Siglev	Sinal de entrada do sensor do levante	Entrada
cts1	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 1	Saída
cts2	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 2	Saída
cts3	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 3	Saída
cts4	Saída do número de sementes do Tudo de Sementes 4	Saída
Ctstotal	Saída do total de sementes dos 4 tubos	Saída
vel_saída	Velocidade em km/h	Saída
vacuo_saída	Vácuo em <i>Ounce Force per Square Inch</i>	Saída
RPM_saída	Rotação por Minuto	Saída
graneleiro_saída	Se o tanque do graneleiro está vazio ou não	Saída
Slevante	Se o implemento está com o levante ativo	Saída

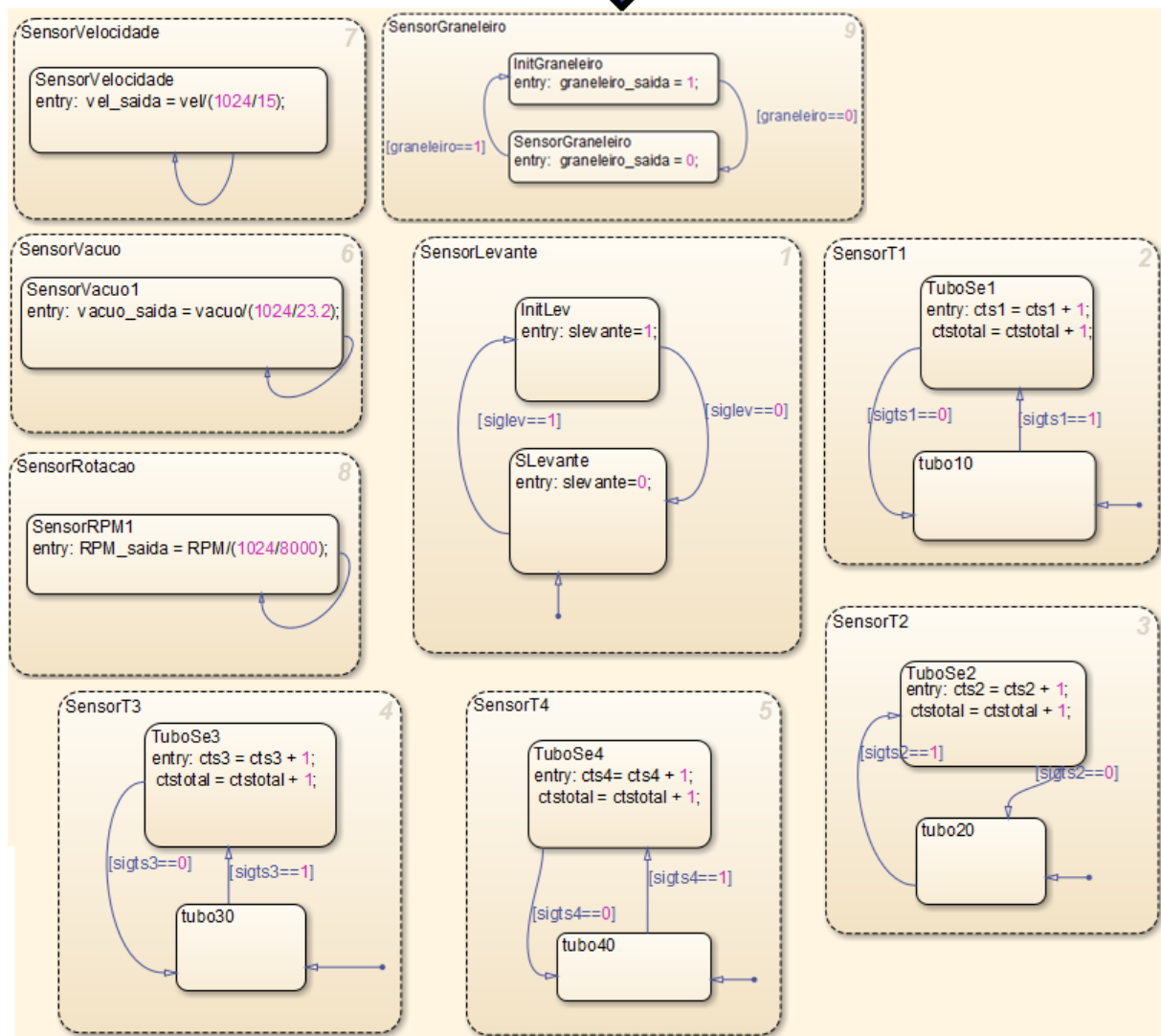
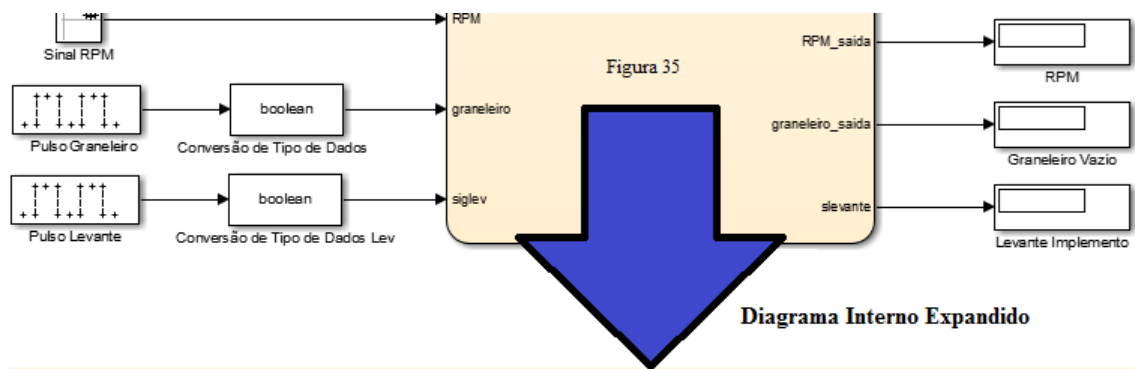
Figura 35 – Diagrama ECU plantadeira de controle dos sensores



A Figura 36 apresenta o diagrama interno do controle dos sensores expandido (da Figura 35), ilustrando os blocos dos sensores da ECU utilizados neste estudo de caso. Esse diagrama também representa as conexões dos sinais de entrada e saída dos sensores.

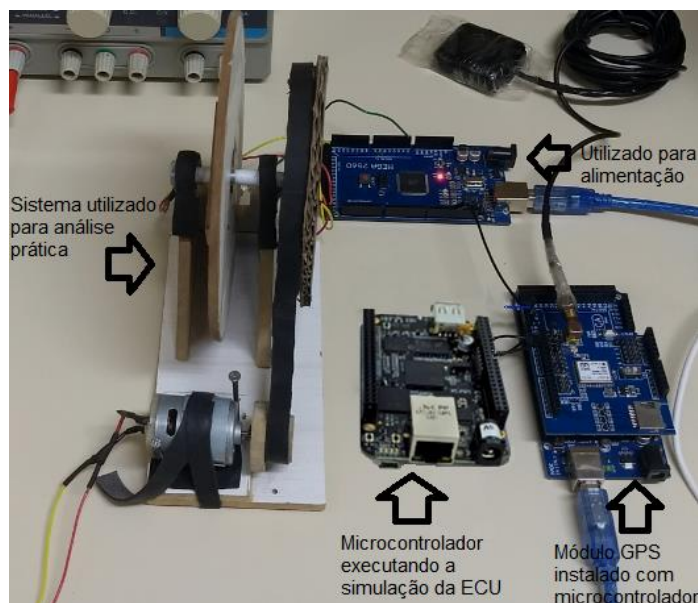
Na Figura 36 verificam-se os subsistemas: SensorVelocidade que controla o sensor de velocidade, SensorGraneleiro que controla o sensor de nível do tanque de graneleiro, SensorVacuo que controla o sensor de vácuo, SensorRotação que controla o sensor de rotação por eixo, SensorLevante que controla o sensor de levante do implemento e os subsistemas SensorT1, SensorT2, SensorT3, SensorT4, cada um controla um tubo de sementes. Cada subsistema será detalhado nesta seção no texto.

Figura 36 – Diagrama expandido de controle dos sensores da ECU



Como forma de simulação da planta física da ECU utilizou-se o microcontrolador AM3359AZCZ100. Na Figura 37 ilustra-se a planta física do sistema.

Figura 37 – Planta física do sistema



Consta na Figura 37 o microcontrolador que executa a simulação conectado através da de comunicação ethernet com o computador executando os softwares, o microcontrolador de apoio com o módulo GPS e o sistema utilizado para a avaliação prática de despejo de sementes.

4.3 Procedimentos para Validação

Realizou-se a validação de cada sensor de forma separada conforme já detalhado na seção 3.2, ocorreu e uma simulação de operação de despejo de sementes com sensores de forma combinada.

4.3.1 Validação dos Sensores

Na seção Resultados constam os gráficos para cada sensor da análise da execução do software da ECU simulada no microcontrolador e no executada no software *Stateflow*[®], após a execução foi realizada a análise das curvas e demonstrado nos gráficos e realizada também análise dos dados de cada sensor para verificar a correlação entre ambas as amostras através da função ‘CORREL’ do software *Excell*[®].

Além dos gráficos, realizaram-se coletas dos dados a cada tempo de execução nas 2 situações e demonstrada análise de correlação entre as 2 amostras para cada sensor.

4.3.2 Função de contagem de sementes – Validação do projeto

Para validação de todo o sistema em uma situação próxima da realizada em operação no campo, realizou-se uma avaliação prática que envolvem dados de sensores de forma combinada, neste caso com os dados dos sensores de tubo de sementes e os dados do sensor de posicionamento global, com intuito de avaliar a quantidade de sementes despejadas, o espaçamento entre o despejo de sementes e a velocidade da plantadeira em cada despejo de sementes, com essas informações consegue-se gerar informações estatísticas a respeito da precisão da dispensa de sementes.

Nesta análise prática simulou-se uma plantadeira com uma linha realizando o semeio de sementes por 10 segundos. Em um primeiro momento com todos os furos desobstruídos e em um segundo momento com 1 buraco obstruído para simular uma falha no despejo automático.

O sistema com o software, microcontrolador, sensor GPS e materiais de apoio foram levados para um veículo e nele fez-se a locomoção por 10 segundos com tempo de execução de 0,5ms em ambas as análises.

Para se avaliar experimentalmente o resultado do projeto embarcado, optou-se por analisar 5 parâmetros, que são:

a) Distância Percorrida pela Plantadeira:

O GPS forneceu a velocidade em nós, esta foi convertida em metros por segundo, e a cada passo (tempo) de execução do software *Statefow*[®], conseguiu-se a distância percorrida através da soma das distâncias, este valor exibe-se em metros.

b) Número Total de Sementes:

É a soma do sinal de saída do sensor de sementes nas 2 análises, com o disco sem obstrução e com o disco com obstrução.

c) Tempo de Execução:

Dado gerado pelo software *Matlab*[®], demonstrando a execução de todo o sistema a cada 0,5ms.

d) Velocidade Média:

Realizou-se a média da velocidade, através da soma de todas as velocidades coletadas e dividida através do número de amostras. Informações exibidas em metros por segundo e quilômetros por hora.

e) Distância entre Sementes:

Refere-se a cada momento que uma semente é depositada, coletou-se a distância percorrida naquele instante, e analisando com a distância percorrida no instante do depósito da semente anterior, conseguiu-se o valor da distância entre as sementes. Foi realizada a média dessa distância em ambas as análises.

Estes dados foram salvos em um vetor dentro do software *Matlab*® a cada tempo de execução de 0,5ms. Essas informações foram transferidas para outros softwares para tabular as informações e realização dos gráficos que constam na seção Resultados.

5. RESULTADOS

Nesta seção seguem os resultados de validação para cada sensor e após o resultado do projeto de monitoramento de distribuição de sementes.

5.1 Resultado da Validação dos Sensores

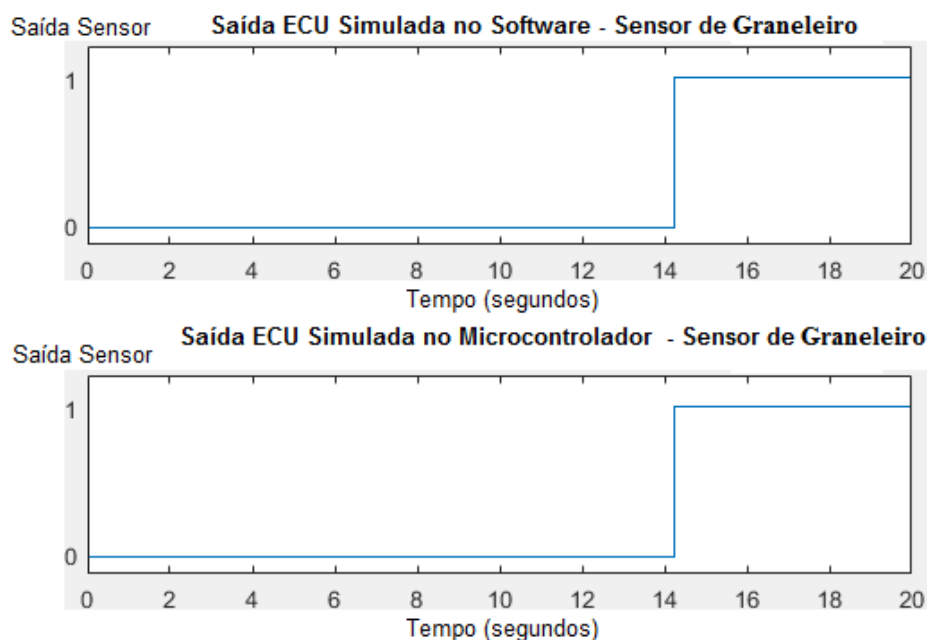
Para cada sensor gerou-se uma entrada com sinais conhecidos para simulação, o mesmo sinal de entrada executou-se na planta modelada no software *Stateflow*® e executou-se no software gravado no microcontrolador.

Coletaram-se a saída simulada no software e a saída simulada no microcontrolador em forma de gráfico e analisaram-se a semelhança entre os dois sinais, para cada sensor, demonstrando esse valor para cada sensor em porcentagem de correlação entre os sinais. A execução ocorreu por 20 segundos com tempo de execução de 0,5ms e gerou 400 amostras em cada avaliação.

a) Resultados de Validação do Sensor de Nível:

Como forma de validação do sensor de nível, gerou-se o sinal através de uma função de geração de pulso do software *Stateflow*®. A Figura 38 ilustra o sinal de saída do sensor de tanque de graneleiro, demonstrando quando a saída do sensor está com sinal '1' o tanque está com quantidade de sementes menor que 10%.

Figura 38 – Gráfico do sinal de saída do sensor de nível do tanque de graneleiro

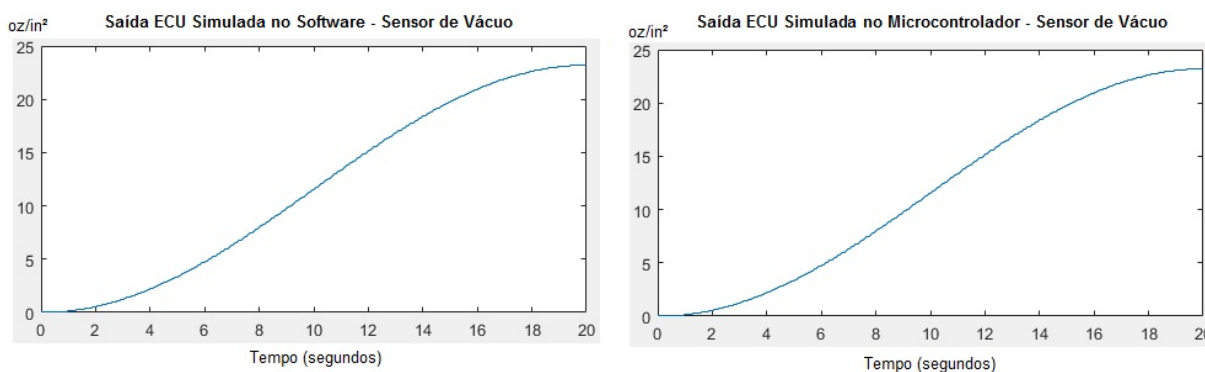


Através da comparação entre os vetores de dados simulado e obtido da plataforma física, obteve-se uma correlação de 100% das amostras contém relação, validando o modelo para este sensor.

b) Resultados de Validação do Sensor de Vácuo:

Como forma de validação do sensor, na Figura 39 ilustra o sinal de saída do sensor de tanque de vácuo através de uma função de geração de sinal do software *Stateflow*[®], demonstrando o valor da pressão do ar, nos valores entre o intervalo de 0 a -23,2 on/in².

Figura 39 – Gráfico do sinal de saída do sensor de vácuo



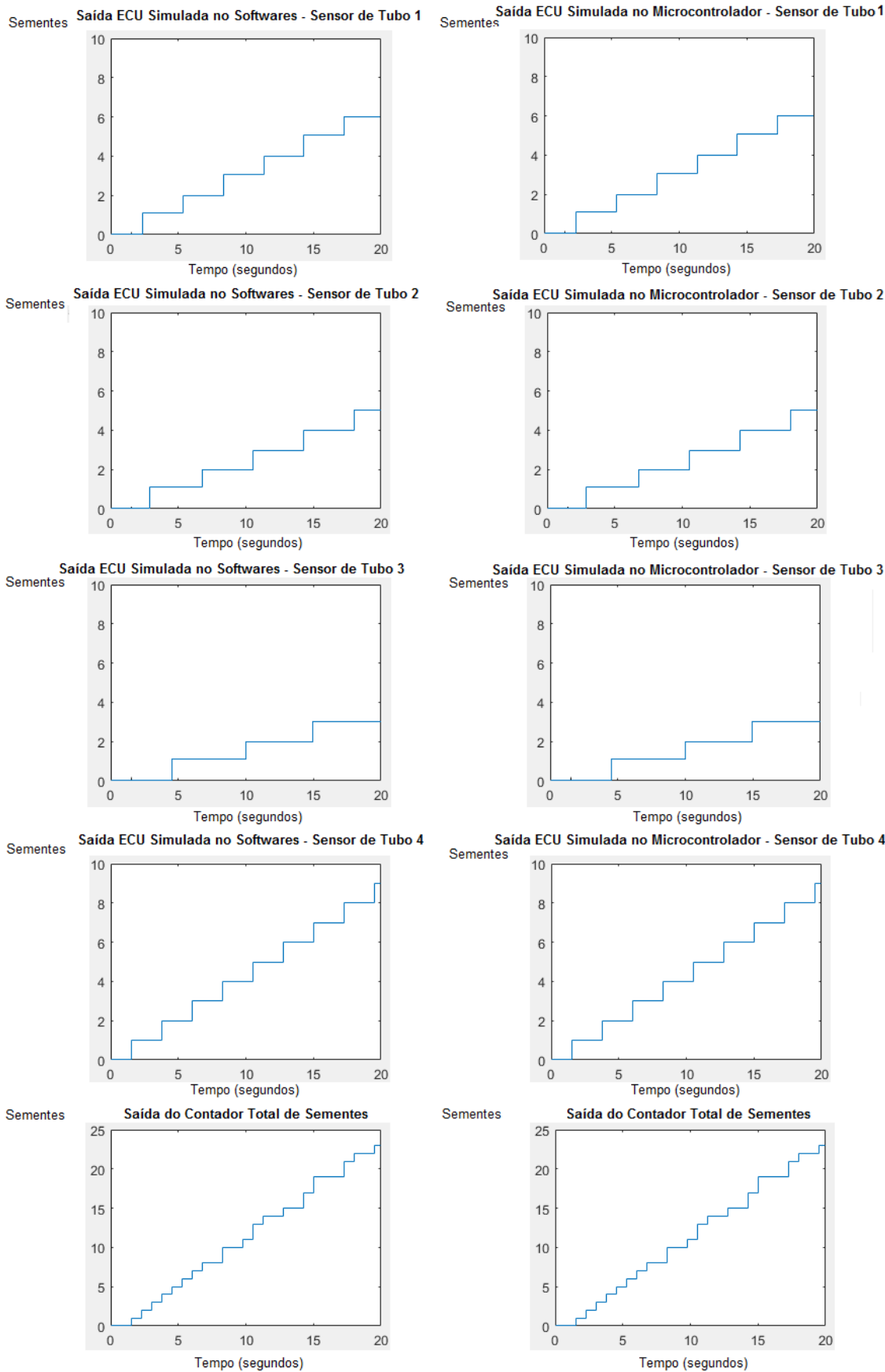
Através da comparação entre os vetores de dados simulado e obtido da plataforma física, obteve-se uma correlação de 100% das amostras contém relação, validando o modelo para este sensor.

c) Resultados de Validação do Sensor de Sementes:

Nas Figuras 40, ilustram-se, respectivamente em forma de gráfico, os sinais de saída dos sensores dos 4 tubos de sementes com a ECU simulada no software e a ECU simulada no Microcontrolador, e a saída do contador total de sementes.

Nota-se na Figura 40 dois conjuntos com 5 gráficos cada, os sinais foram gerados através de uma função de gerador de pulso do software *Stateflow*[®], no primeiro tubo somou 6 sementes, no segundo tubo somou 5 sementes, no terceiro tubo somou 3 sementes e no quarto tubo somou 9 sementes, no quinto e último gráfico consta a soma da saída incremental de cada tubo de sementes com a simulação executada no software *Simulink*[®], no segundo conjunto de 4 gráficos constam as saídas dos 4 tubos e o último gráfico com a soma dos 4 tubos, com a simulação executada no hardware – ECU.

Figura 40 – Gráfico do sinal de saída dos sensores do tubo de sementes – ECU Simulada no Software e no Microcontrolador

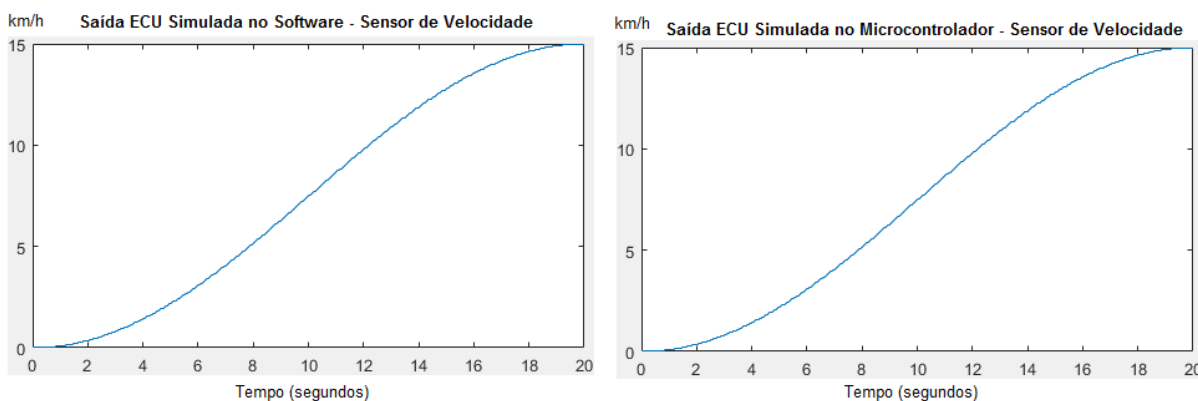


Através da comparação entre os vetores de dados simulado e obtido da plataforma física, obteve-se uma correlação de 100% das amostras contém relação, validando o modelo para este sensor.

d) Resultados de Validação do Sensor de Velocidade:

Na Figura 41, ilustra-se em forma de gráfico os sinais de saída do sensor de velocidade indutivo gerado através de função de geração de sinal através do software *Stateflow*[®] com a ECU simulada no Software e a ECU simulada no Microcontrolador.

Figura 41 – Gráfico do sinal de saída do sensor de velocidade

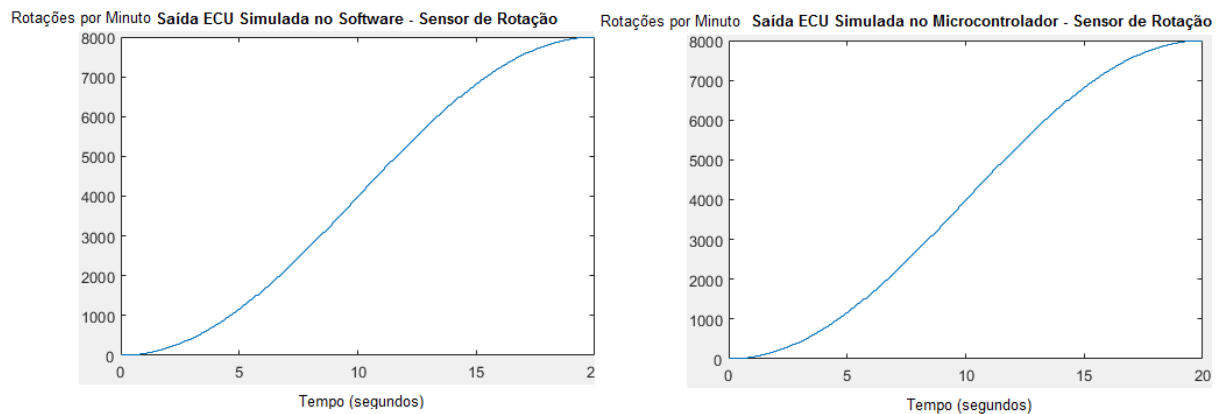


Através da comparação entre os vetores de dados simulado e obtido da plataforma física, obteve-se uma correlação de 100% das amostras contém relação, validando o modelo para este sensor.

e) Resultados de Validação do Sensor de Rotação:

Na Figura 42, ilustra-se em forma de gráfico os sinais de saída do sensor de rotação por eixo, gerado através de função de gerador de sinais do software *Stateflow*[®], com a ECU simulada no Software e a ECU simulada no Microcontrolador.

Figura 42 – Gráfico do sinal de saída do sensor de rotação

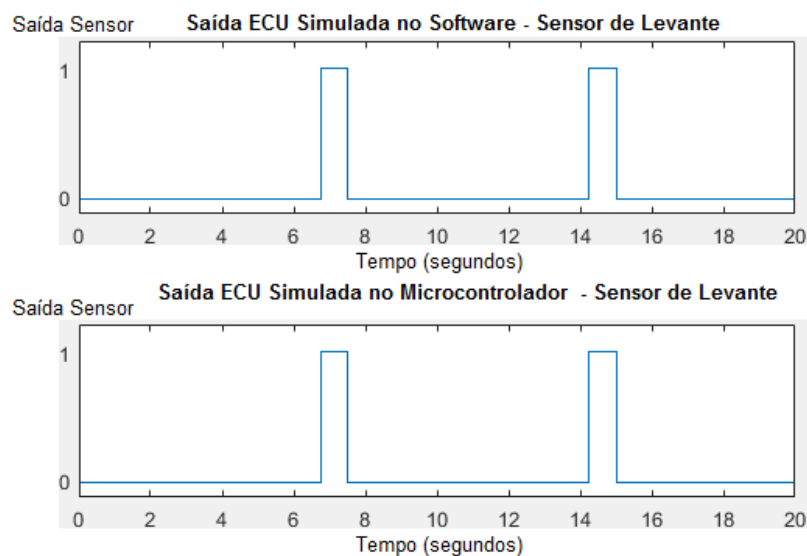


Através da comparação entre os vetores de dados simulado e obtido da plataforma física, obteve-se uma correlação de 100% das amostras contém relação, validando o modelo para este sensor.

f) Resultados de Validação do Sensor de Levante:

Na Figura 43, ilustra-se em forma de gráfico os sinais de saída sensor de levante do implemento gerado através de função de geração de pulsos do software *Stateflow*[®], com a ECU simulada no Software e a ECU simulada no Microcontrolador.

Figura 43 – Gráfico do sinal de saída do sensor do levante



Através da comparação entre os vetores de dados simulado e obtido da plataforma física, obteve-se uma correlação de 100% das amostras contém relação, validando o modelo para este sensor.

5.2 Resultado do Projeto de Monitoramento e Distribuição de Sementes

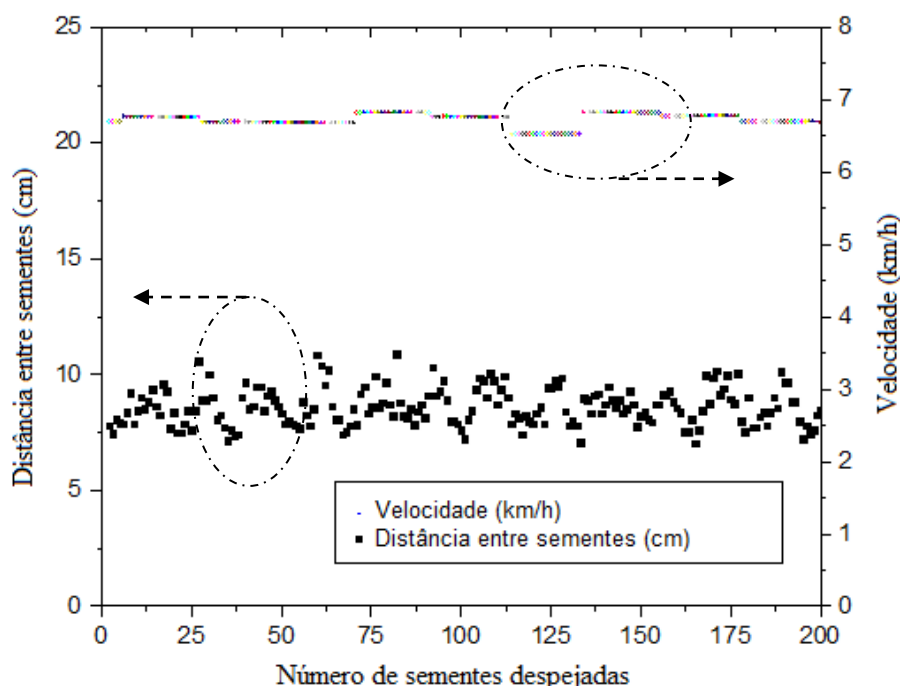
Nesta seção seguem os resultados das 2 análises práticas baseadas nas 2 formas distribuição automática de sementes, com e sem obstrução. Através dos dados coletados conseguiu-se a diferença de tempo entre cada semente depositada e estão dispostos em gráficos e constam demais informações sobre a simulação do plantio.

5.2.1 Resultado com Distribuição Automática de Sementes – Sem Obstrução

Nesta seção estão descritos os resultados realizados através do sistema de despejo automático de sementes com a análise com os 16 furos do disco de sementes sem obstrução.

A velocidade média da análise foi de 6,73 km/h, média de espaçamento entre sementes foi de 8,57 cm e com uma distância total de 10,83 metros, totalizando 215 sementes. Segue na Figura 44 o gráfico com a análise da disposição de sementes sem obstrução.

Figura 44 – Análise da disposição de sementes sem obstrução



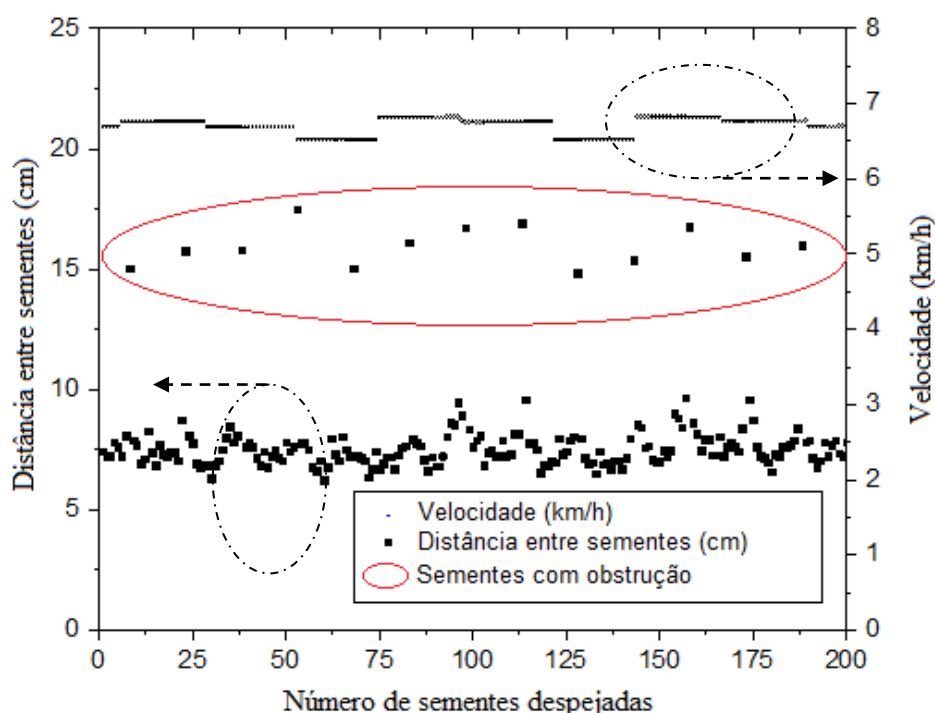
Nota-se na Figura 44 que apesar da dificuldade de manter a velocidade constante por ser uma avaliação experimental em um veículo com locomoção, ocorreu pouca modificação durante a avaliação, o que possibilitou um despejo de sementes com baixa variação a cada semente, resultado próximo a realidade de uma disposição de sementes em uma plantadeira.

5.2.2 Resultado com Distribuição Automática de Sementes – Com Obstrução

Nesta seção estão descritos os resultados realizados através do sistema de despejo automático de sementes com a análise com o disco de sementes de 16 furos do disco de sementes e 1 furo com obstrução.

A velocidade média da análise foi de 6,71 km/h, média de espaçamento entre sementes foi de 8,57 cm e com uma distância total de 10,83 metros, totalizando 215 sementes. Segue na Figura 45 o gráfico com a análise da disposição de sementes sem obstrução.

Figura 45 – Análise da disposição de sementes com obstrução



Nota-se na Figura 45 que a velocidade ocorreu dentro de uma média sem grande variação, mesmo com dificuldade pelo veículo estar em locomoção em um teste experimental. A distância entre as sementes nota-se destacado com a cor vermelho que algumas amostras constam acima da linha de 15 cm, essas amostras correspondem a obstrução de um furo no disco de sementes, com isso, o tempo de caída de uma semente é "dobrado", ou seja, se a distância média de liberação de cada semente está entre 7,5 e 8cm, com uma obstrução, é esperado que a próxima semente seja dispensada a aproximadamente 16cm da anterior, conforme indicado pelo gráfico, demonstrando o funcionamento da obstrução em 1 furo do disco de sementes.

6. CONCLUSÕES

No desenvolvimento deste trabalho na aplicação da metodologia de desenvolvimento baseada em modelos (MBD) focado em máquinas e implementos agrícolas, pode-se observar a importância da ampliação de estudos e da necessidade de maiores aplicações desta metodologia para outras áreas, além da automotiva e aérea. Além da necessidade de maiores estudos nacionais sobre o tema.

Os softwares utilizados em grande parte do projeto *Matlab/Simulink*[®] e *Stateflow*[®] possuem alta compatibilidade com a metodologia MBD, permitindo um eficaz desenvolvimento. Na etapa de requisitos do projeto a possibilidade de alteração diretamente no modelo demonstrou-se uma rápida alternativa para correção de erros nesta fase inicial do projeto.

Outro ponto interessante da utilização do MBD e da utilização dos softwares já citados é a geração automática dos códigos de linguagem de programação, além da diminuição do tempo de programação, possibilitando uma adaptação destes códigos gerados de forma automática ao hardware utilizado. O próprio software *Matlab/Simulink*[®] faz o *upload* do programa ao microcontrolador, sem a necessidade de acertos complexos ou manuais diretamente na placa.

Para a validação de cada bloco/função isoladamente, utilizou-se um microcontrolador auxiliar, de forma a gerar sinais analógicos e digitais conhecidos, e assim poder avaliar os sinais obtidos pelas saídas da ECU (simulada através do software *Simulink*[®] e real, embarcada em um microcontrolador ARM Cortex M-8 de uma placa BeagleBone Black e assim pode-se comparar os resultados.

Realizarem-se testes com outros microcontroladores, porém escolheu-se o BeagleBone Black pela sua transferência ser em ethernet, executando a software com tempo de execução escolhido sem travamentos ou atrasos. Desta forma, na validação do sistema com sensores combinados o funcionamento do sistema e podendo corrigir os possíveis erros em cada etapa do projeto de forma fácil, diretamente no software utilizado, com isto trazendo segurança e confiabilidade no projeto da ECU.

Outro ponto que se pode citar de forma positiva da utilização da metodologia é o conceito de reutilização do projeto desenvolvido, e por este motivo, sua fácil readaptação e correção de falhas. Os blocos gerados podem ser utilizados para o desenvolvimento de novas aplicações agrícolas ou realizar melhorias no próprio sistema, sendo este um conceito interessante para a indústria nacional agrícola e para os fabricantes.

Como forma de avaliação geral do sistema próximo da realidade de um plantio, desenvolveu-se uma avaliação baseado em modelo utilizando sensores combinados, desenvolveu-se um sistema de despejo automático de sementes para simular o tubo de sementes e o sensor de posicionamento global, para analisar a dispensação de sementes, monitorando a distância entre sementes (número de sementes por metro), velocidade média e demais dados estatísticos do semeio.

Com essa análise conseguiu comprovar o funcionamento da ECU em uma situação próxima da realidade, com diferenças entre os dados de ambas as análises realizadas, constatando claramente em gráficos a análise sem a obstrução no tubo e na análise com a obstrução no tubo de sementes.

Analisou-se que a metodologia se adequou de forma satisfatória para o desenvolvimento de aplicações com funções agrícolas, pela possibilidade de rápida modelagem e principalmente na validação dos requisitos do projeto da ECU da plantadeira, realizados diretamente nos softwares de apoio.

REFERÊNCIAS

- AEF. **Site Oficial - Agricultural Industry Electronics Foundation**. Disponível em: <<http://www.aef-online.org>>. Acessado em 15 de Janeiro de 2017.
- AGROSYSTEM. **Descritivo de Produtos - 2017**. Disponível em: <www.agrossystem.com.br/catalogo.pdf>. Acessado em 10 de Janeiro de 2017.
- ANFAVEA. **Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2017.
- ASSIS, A. C. **Implementação e Avaliação do Protocolo FFT-CAN Sobre o Sistema Autosar**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- ATMEL DATASHEET. **Atmel - SMART ARM-based MCU SAM3X / SAM3A Series**. Disponível em: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf>. Acessado em 25 de Março de 2017.
- BABIC et al. **Introducing Model-Based Techniques into Development of Real-Time Embedded Applications**. Online ISSN 1848-3380. AUTOMATIKA 524, 329–338, 2011.
- BADDELEY, G. **GPS - NMEA sentence information**. Disponível em: <<http://aprs.gids.nl/nmea/>>. Acessado em 17 de Fevereiro de 2017.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**, São Paulo, Editora. Manole, 307p, 1987.
- BEAGLEBOARD, **BeagleBone Black System Reference Manual**. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf>. Acessado em 12 de Janeiro de 2017.
- BELL, J. **Network protocols used in the automotive industry**. SoftFMEA doc. ref. SD/TR/PRO/01. 2002.
- BERNARDI, J. V. E.; LANDIM, P. M. B. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na Coleta de Dados**. UNESP, Departamento de Geologia Aplicada (IGCE), Laboratório de Geomatemática, Texto Didático 10, Rio Claro, 2002
- BERTELI, G. A. et al. **Desempenho da plantabilidade de semeadoras pneumática na implantação da cultura da soja no cerrado piauiense – Brasil**. Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science, Guarapuava-PR, v.9, n.1, p.91-103, 2016.
- BEZERRA NETO, J. F. B. **Noções do Sistema de Informações Geográficas - GPS**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2013.
- BLANK, S; KORMANN, G; BERNS, K. **A Modular Sensor Fusion Approach for Agricultural Machines**. Robotics Research Lab University of Kaiserslautern, Germany. Disponível em: <http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H93000/H93100/CIOSTA_Presentations/Blank.pdf> 2011.

BONACORSO, N. G.; Noll, V. **Automação Eletropneumática** - 11.^a ed., São Paulo: Erica, 2004.

BOSCH G. R. **CAN Specification**. Robert Bosch GmbH, Postfach 30 02 40, D-70442 Stuttgart. Disponível em: <http://www.bosch-semiconductors.de/media/ubk_semiconductors/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf>. 1991.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos**. V.4 – Safra 2016/2017. N.6 Sexto Levantamento. Março de 2017.

CONCEIÇÃO, L. A; VALERO, C. **Evolução e aplicação da mecatrônica em máquinas agrícolas**. Vida Rural. Abril de 2013.

CONSTABLE, G.; SOMERVILLE, B. **A Century of Innovation: Twenty Engineering Achievements That Transformed Our Lives**. Washington, D.C. 2003.

COSTA, F. T.; SCHIEBELBEIN, L. M.; SANTOS, M. M. D.; STEVAN, S. L. **Evolução de Sensores em Máquinas Agrícolas**. X Congresso Brasileiro de Agroinformática -SBIAGRO. 2015. A

COSTA, F. T.; SCHIEBELBEIN, L. M.; SANTOS, M. M. D.; STEVAN, S. L. **Uma Visão Geral da Aplicação de Sensores em Máquinas Agrícolas**. X Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO). 2015. B

DENARDIN, G. W. **Microcontroladores**. Apostila Técnica. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville – Centro de Ciências Tecnológicas. 2015.

DERRY, T. K.; WILLIAMS, T. I. **A Short History of Technology: From Earliest Times to A.D. 1900**. 1977.

DICKEY-JHON. **Site Oficial**. Disponível em: < <http://www.dickey-john.com>>. 2017.

DICKEY-JHON. **Descritivo de Produtos InterliAG - 2016**. Disponível em: <http://www.dickey-john.com/_media/IntelliAg%20Brochure_US_11071-0391_RevA_Web.pdf>. 2016.

ETAS. **Model Based Design Approach For Automotive Applications**. Apresentado por Shenoy, R. K. 10/07/2014.

FANTUZZI, C. Capítulo 02- **Modeling**: Modena: Università Degli Studi di Modena e Reggio Emilia, 2014. 55 slides.

FERO, A. **O setor de máquinas agrícolas no Brasil: evolução nos últimos anos e perspectivas**. Disponível em: <<http://www.celeres.com.br/o-setor-de-maquinas-agricolas-no-brasil-evolucao-nos-ultimos-anos-e-perspectivas/>> Acesso em: 10 de Junho de 2015. Ano 2014.

FERRAZ, R. B. D, **Proposta de Ferramenta para desenvolvimento de simuladores**. Dissertação de Mestrado, USP - Universidade de São Paulo - São Paulo, 2010.

FERREIRA; VEGRO, **Máquinas agrícolas: crise impede retomada das vendas no mercado interno.** Instituto de Economia Agrícola. Disponível em <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=5074>>. Acessado em 10/03/2017. 2006.

FONSECA, M. D. G. D.; **Concorrência e progresso técnico na indústria de máquinas para agricultura: um estudo sobre trajetórias tecnológicas.** Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo. 1991.

FRAGA, V. S.; SALCEDO, I. H. **Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsystems farming.** Soil Science Society of America Journal, v.68, n.1, p.215-224, 2004.

FRANCETTO et al. **Consumo efetivo de combustível em função do emprego de diferentes discos de corte associados a uma haste sulcadora.** XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, At São Pedro. 2015.

FREDERIKSEN, A. **Model-Based Design of Advanced Motor Control Systems.** Analog Devices, Artigo Técnico, MS-2577, 2013.

FREDO, C. E.; SILVA, R. L. P; VEGRO, C. L. R. **Setor Agropecuário é o Único com Crescimento nos Empregos Formais em 2015.** Instituto de Economia Agrícola. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=14215>>. 2016.

FROLICH, A. A; SOUZA, D. T; BRATTI, D. **Sistemas Automotivos Embarcados.** Manual Técnico. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.lisha.ufsc.br/teaching/os/ine5355-2008-2/work/auto.pdf>>. 2008.

FUENTES, R. C. **Apostila de Automação Industrial.** Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

GALHARDI, A. C; PINTO, C. E. C. **O desenvolvimento de sistemas complexos: aplicação do model based design e model based testing na produção de aeronaves.** Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2013.

GARCIA, R. F. **Semeadoras agrícolas.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Laboratório de Engenharia Agrícola. 2012.

GODOY, E. P, **Desenvolvimento de uma Ferramenta de Análise de Desempenho de Rede CAN (Controller Area Network) para Aplicações em Sistemas Agrícolas.** Dissertação de Mestrado, USP - Universidade de São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, A. A. **Eletrônica Embarcada Automotiva.** 1ª Editora Érica, São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, A. A. **Análise da norma ISSO 11783 e sua utilização na implementação do barramento do implemento de um monitor de semeadora.** Dissertação de Mestrado, USP – Universidade de São Paulo, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em:
<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>.
 Acessado em 23 de Abril de 2017.

IEEE: **Top Ten Programming Languages**. Disponível em:
<http://spectrum.ieee.org/computing/software/the-2015-top-ten-programming-languages>.
 Acessado em 18 de Novembro de 2015.

JHON DEERE. **Site Oficial**. Disponível em: < <https://www.deere.com.br/>>. 2017.

JHON DEERE. **Catálogo de Peças, Partes, Produtos**. Disponível em: < <https://jdpc.deere.com>>. 2015.

JIAN-JUN, L. **The Study on Agricultural Machinery Design and Modeling Method**. International Journal of Advancements in Computing Technology. 2012.

KELEMENOVÁ, T et al. **Model Based Design and HIL Simulations**. 2013. American Journal of Mechanical Engineering, 2013.

LAN, Y et al. **Opto-electronic Sensor System for Laboratory Measurement of Planter Seed Spacing with Small Seeds**. Journal of Agricultural Engineering Research 72 ed., pp. 119-127. 1999.

LUGLI, A. B.; RODRIGUES, R. B. **Nova tecnologia de sensoriamento indutivo para automação industrial**. Revista Controle & Instrumentação – Edição nº 190 – 2013

MATHWORKS. **MATLAB® The Language of Technical Computing, User's Guide v7** 2005.

MATHWORKS. **Stateflow® and Stateflow® Coder - For Complex Logic and Diagram Modeling, User's Guide v5**. 2002.

MENDES, H.; SANTOS, P. **Redes de Comunicação Automóveis**. SIAUT - Sistemas Automóveis. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2007.

MULLA, D. G. **Twenty Five Years of Remote Sensing in Precision Agriculture: Key Advances and Remaining Knowledge Gaps**. Biosystems Engineering Journal, Abril de 2013.

NEME, J. H. Z. **Aplicação do Método de Desenvolvimento Baseado em Modelos para uma Função de Software Automotivo: Sistema de Iluminação Externa**. Trabalho de Conclusão de Curso, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. 2014.

ORD, D. A. **Advanced Vehicle Powertrain Design using Model-Based Design**. Dissertação de Mestrado na Virginia Polytechnic Institute and State University, 2014.

PATSKO, L. F. **Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**. Empresa Maxwell Bohr. Disponível em:

<http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf>. 2006.

PEETS, S. et al. **Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors.** Computers and Electronics in Agriculture, New York, v. 81, n. 1, p. 104-112, Feb. 2012.

PEDROSO, L. F. **Injeção Eletrônica, Manual Técnico.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2002.

PEREIRA et al. **Software embarcado, o crescimento e as novas tendências deste mercado.** Revista de ciências exatas e tecnologia. 2014.

PEREIRA, R. V. M.; ZEFERINO, C. V. **Aplicação do protocolo lin como sub-rede can.** VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. 2008.

PIRES, A. J. M. **Comunicação de tempo-real em barramentos CAN baseados no controlador SJA1000.** Dissertação. Universidade Moderna do Porto. 2005.

POGETTO, G. D. **Critérios para seleção da Arquitetura Elétrica Veicular em Mercados Emergentes.** Dissertação de Mestrado. USP - Universidade de São Paulo. 2009.

RASSMUSSEN, E. G. **The Mechanization of Agriculture,** SCL AM. 1983.

REEDY, J.; LUNZMAN, S. **Model Based Design Accelerates the Development of Mechanical Locomotive Controls.** SAE 2010 Commercial Vehicle Engineering Congress. doi:10.4271/2010-01-1999, 2010.

REID, J. F. **The Impact of Mechanization on Agriculture.** Journal The Bridge, Volume 41, Number 3. 2011.

RENNA, R. B. D et al. **Introdução ao kit desenvolvimento Arduino.** Tutoriais PET-Tele Universidade Federal Fluminense – UFF, 2013.

RESENDE, D. C. F; BORELLI, W. C. **Proposta de uma Rede de Comunicação Automotiva Baseada no FlexRay.** XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT 2007, RECIFE, PE. 2007.

ROCKWELL AUTOMATION. Catálogo de Medidas de proteção e equipamento complementar. Disponível em: <<http://www.ab.com/pt/epub/catalogs/3377539/5866177/3378076/7131359/print.html>>. Acessado em 14 de Fevereiro de 2017. 2015.

SANTOS, J. G. **Agricultura de precisão: Máquinas.** UNES – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Doutorado em Mecânica. 2007.

SHANG, D. et al. **A case study on the model-based design and integration of automotive cyber-physical systems.** Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference. 2013.

SOUSA, R. et al. **Redes Embarcadas em Máquinas e Implementos Agrícolas: o Protocolo CAN (Controller Area Network) e a ISO11783 (ISOBUS)**. EMBRAPA, ISSN 1518-7179, 2007

SOUSA, R. V.; LOPES, W. C.; INAMASU, R. Y. **Automação de máquinas e implementos agrícolas: eletrônica embarcada, robótica e sistema de gestão de informação**. Parte IV - Capítulo 11, EMBRAPA, 2014.

SILVA, B. C. C. **Desenvolvimento de Software Embarcado Automotivo Aderente ao Padrão AUTOSAR**. Monografia, Universidade de Brasília – UNB. 2014.

SILVA, J. G.; KLUTHCOUSKI, J.; SILVEIRA, P.M. **Desempenho de uma semeadora-adubadora no estabelecimento e na produtividade da cultura do milho sob plantio direto**. Scientia Agrícola, Piracicaba, v.57, n.1, p.7-12, 2000.

STELLA, G. N. D. **Aplicando a Metodologia Baseado em Modelos para Funções de Software Automotivo**. Dissertação de Mestrado, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. 2015.

TEMPO. **Site Oficial da Tempo Planter**. Disponível em: < <http://tempoplanter.com/>>, 2015.

TEIXEIRA, J. C.; **Modernização da Agricultura no Brasil: Impactos econômicos, sociais e ambientais**. Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros – Seção Três Lagoas Três Lagoas, Mato Grosso do Sul. V 2 – nº 2 – ano 2. 2005

UBLOX NEO-6M. **Datasheet**. Disponível em: < [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)> Acessado em 10 de Março de 2017.

VIAN, E. F.; JUNIOR, A. M. A. **Origens, Evolução e Tendências da Indústria de Máquinas Agrícolas**. 48º Congresso SOBER, Vol. 51, Nº 4, p. 719-744, Campo Grande, Mato Grosso do Sul. 2010.

VIZZOTTO, V. R. **Desempenho de mecanismos sulcadores em semeadora-adubadora sobre os atributos físicos do solo em várzea no comportamento da cultura da soja (Glycine max L.)**. 15 ago. 2014. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

WATANABE, E. H. **APLICAÇÃO DE SOFTWARE ABERTO EM REDES INDUSTRIAIS**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2006.

WHALEN, M. **Why We Model: Using MBD Effectively in Critical Domains**. University of Minnesota. 19/05/2013.

WENDLING, M. **Sensores**. Universidade Estadual Paulista. Manual Técnico. 2010.

WETT, B. et al. **Model based design of an agricultural biogas plant – application of Anaerobic Digestion Model No.1 for an improved 4 chamber scheme**. 7º INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WASTE MANAGEMENT PROBLEMS IN AGRO-INDUSTRIES, Amsterdam. 2006.

YOO, I. et al. **Performance Interpretation Method for Electrical Tractor Based on Model-Based Design.** IT Convergence and Security (ICITCS), 2013 International Conference. IEEE. 2013.