

Rafael Augusto Mariano

## **Módulo de acionamento e controle de pontas de pulverização baseado em uso de rede CAN**

São Carlos - SP

2015, 15 de novembro



Rafael Augusto Mariano

## **Módulo de acionamento e controle de pontas de pulverização baseado em uso de rede CAN**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Universidade de São Paulo - USP

Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dra. Vilma Alves de Oliveira

São Carlos - SP

2015, 15 de novembro

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

Mm                      Mariano, Rafael Augusto  
                             Módulo de acionamento e controle de pontas de  
                             pulverização baseado em uso de rede CAN / Rafael  
                             Augusto Mariano; orientadora Vilma Alves de Oliveira.  
                             São Carlos, 2015.

                             Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
                             ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
                             Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
                             2015.

                             1. Redes de comunicação CAN. 2. pulverização de  
                             precisão. 3. acionamento de pulverizadores. 4. controle  
                             de pulverização. I. Título.



# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rafael Augusto Mariano

Título: "Módulo de acionamento e controle de pontas de pulverização baseado em uso de rede CAN"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 01/12/2015,

com NOTA 10,0 ( Dez, zero ), pela Comissão Julgadora:

*Profa. Titular Vilma Alves de Oliveira - (Orientadora - SEL/EESC/USP)*

*Dr. Ricardo Yassushi Inamasu - (EMBRAPA)*

*Mestre Heitor Vinicius Mercaldi - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

*Dedico este trabalho aos meus pais e avós.*

# Agradecimentos

À minha família, que me apoiou em todos os momentos.

À minha orientadora Prof(a). Dra. Vilma Alves de Oliveira por todas as oportunidades que me foram oferecidas durante a graduação, pelos inúmeros conselhos e pela amizade.

Aos meus colegas de trabalho, Heitor Mercaldi, Elmer Alexis Gamboa Peñaloza e Evandro Mercaldi por toda ajuda no desenvolvimento desse projeto e pela amizade.

À Embrapa Instrumentação e ao meu co-orientador, Dr. Paulo Estevão Cruvinel, pela oportunidade, aprendizado e conselhos. Também ao Comitê Gestor do projeto MP2 (processo 02.07.11.07.25.00.00) pelo apoio financeiro e bolsa concedida.

Aos membros do Laboratório de Controle, pela amizade e troca de conhecimento.

Aos meus irmãos de República, Alexandre, Caio, Guilherme, Levi, Matheus Perez, Matheus Pusinhol, Pedro, Rafael, Ramon, Rodrigo, Thiago, Victor, Vinícius, William Michele, William Nogueira e Yukio por todos os grandes momentos juntos.

A todas as outras grandes amizades que fiz durante a graduação, Pedro, Fabiano, Vinícius Gaspar, Meigarom e aos membros do Curso de Engenharia Elétrica com ênf. em Sistemas de Energia e Automação do ano de 2010.



# Resumo

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de acionamento de válvulas solenoides e pontas de pulverização baseado no uso de rede de comunicação com protocolo Controller Area Network (CAN, do inglês). A rede de comunicação contém dois nós, um para realizar o acionamento das válvulas solenoides e o outro para controle da operação. O nó de acionamento é composto de um microcontrolador PIC da família 18 com controlador CAN integrado e um transceptor de nível. O nó de controle é formado por um microcomputador com o aplicativo Labview e dispositivo de conexão, contendo transceptor e controlador CAN internos. Foram realizados ensaios de transmissão e recepção de mensagens para análise da robustez da rede, taxas de transmissão máximas e mínimas para dada velocidade e carregamento do barramento. Utilizou-se um controlador proporcional integrativo derivativo (PID) para regular a pressão na barra de pulverização. A validação ocorreu utilizando o Sistema de Desenvolvimento para Pulverizadores Agrícolas instalado no Laboratório de Pulverização Agrícola de Precisão (LPAP), instalado na Embrapa Instrumentação, o qual conta com a parceria institucional do Laboratório de Controle (LAC) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP). Os resultados mostram a eficiência das redes CAN para o acionamento e controle de pontas de pulverização.

**Palavras-chaves:** Redes de comunicação CAN, pulverização de precisão, acionamento de pulverizadores, controle de pulverização.



# Abstract

This study aimed to develop a solenoid valve drive system and spray nozzles based communication network with use Controller Area Network (CAN) protocol. The communication network contains two nodes, one to perform the activation of the solenoid valves and the other for control of the operation. The drive node is composed of a PIC family microcontroller with integrated CAN controller 18 and a level transceiver. The control node consists of a microcomputer with Labview application and connecting device containing transceiver and internal CAN controller. Transmission and receiving testes were conducted for analysis of network robustness, maximum and minimum transmission rates for a given speed and bus loading. Proporcional integrative derivative controller (PID) was used to regulate the pressure in the spray bar. The validation occurred using the Development System for Agricultural Sprayers installed on Precision Agriculture Spray Laboratory (LPAP), installed at Embrapa Instrumentation, which has the institutional partnership Control Laboratory (LAC) of the School of Engineering of São Carlos ( EESC - USP). The results show the effectiveness of the CAN networks for the actuation and control of the spray tips.

**Key-words:** CAN communication networks, precision spraying, drive sprayers, spray control.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Quantidade excessiva de fiação na cabine de um trator em virtude dos inúmeros equipamentos instalados. Fonte: Nissen (2008). . . . .	21
Figura 2 – Pulverizadores agrícolas. . . . .	23
Figura 3 – Válvulas da série QJS da Teejet. Fonte: Teejet (2015). . . . .	23
Figura 4 – Pontas de pulverização. . . . .	24
Figura 5 – Classificação dos DIS de acordo com o local onde é injetada a calda. Retirado de Mercaldi (2012). . . . .	26
Figura 6 – Modelo OSI: Comunicação entre dois sistemas de diferentes arquiteturas.	30
Figura 7 – Fluxograma da organização do algoritmo de funcionamento do CSMA. . .	31
Figura 8 – Dispositivos conectados a um mesmo barramento de uma rede de campo. Retirado de: Sousa (2002). . . . .	32
Figura 9 – Tempo de bit. Adaptado de: Natale (2008). . . . .	34
Figura 10 – Terminação de um barramento operando no padrão ISO 11898. Adaptado de: Natale (2008). . . . .	38
Figura 11 – Níveis de tensão para os estados recessivo e dominante. Retirado de: Natale (2008). . . . .	38
Figura 12 – Formato dos frames de dados para os padrões CAN 2.0A e CAN 2.0B. Retirado de: Sousa (2002) . . . . .	39
Figura 13 – Processo de aceitação ou rejeição de uma mensagem transmitida pelo barramento. Retirado de: di Natale (2008) . . . . .	42
Figura 14 – Registrador responsável por armazenar as mensagens recebidas. A característica First Input First Output faz com que a primeira mensagem a entrar no registrador, seja a primeira a ser processada. Adaptado de: Philips (2000) . . . . .	47
Figura 15 – Tempo de subida dos sinais CAN <sub>L</sub> e CAN <sub>H</sub> para diferentes valores de resistores. Retirado de: Microchip (2010). . . . .	48
Figura 16 – Tabela verdade dos pinos $\overline{STB}$ e EN para seleção dos modos de operação. Retirado de: Philips (2007). . . . .	49

Figura 17 – Ilustração das conexões entre as válvulas solenoides, driver de acionamento e as UCEs. Em (1) têm-se o conjunto de válvulas solenoides e bicos de pulverização. Em (2) é possível ver as 4 placas de utilizadas para acionar as válvulas solenoides. Em (3) está a UCE de Acionamento, onde tem-se um microcontrolador PIC18f46k80 com controlador CAN interno e um transceptor de nível MCP2551. O controle dessa unidade é realizado pela interface supervisória da UCE de controle (4). Essa unidade está abrigada em um microcomputador. As duas UCE estão conectadas utilizando-se o dispositivo <i>CAN break out box</i> , exibido em (5).	50
Figura 18 – Arquitetura de uma ECU genérica . . . . .	51
Figura 19 – Estrutura do algoritmo de verificação das mensagens recebidas para início da rotina de acionamento das válvulas de pulverização. . . . .	52
Figura 20 – Interface supervisória desenvolvida em ambiente Labview. . . . .	52
Figura 21 – Vista frontal da bancada de pulverização utilizada no trabalho. Ao fundo está o painel de componentes elétricos, eletrônicos e hidráulicos. Mais a frente pode-se ver a seção de barra com os bicos e pontas de pulverização. (Imagem cedida pelo Laboratório de Pulverização de Precisão Embrapa / LAC). . . . .	53
Figura 22 – Ilustração do sistema de pulverização utilizado para o projeto. O sistema permite aplicação a taxas variáveis com módulo de injeção direta central. Adaptado de: Felizardo et al. (2013). . . . .	54
Figura 23 – Conjunto de válvulas QJS e bicos de pulverização ISO 110-04 utilizados no trabalho (Imagem cedida pelo Laboratório de Pulverização de Precisão Embrapa / LAC). . . . .	54
Figura 24 – Sinais registrados nas linhas de transmissão do barramento CAN quando uma mensagem é enviada pela UCE de controle. . . . .	55
Figura 25 – Taxa de transmissão de mensagens para velocidade de 125 Kbit/s e três diferentes tamanhos do campo de dados da mensagem. . . . .	56
Figura 26 – Taxa de transmissão de mensagens para velocidade de 250 Kbit/s e três diferentes tamanhos do campo de dados da mensagem. . . . .	57
Figura 27 – Ilustração de cada teste. . . . .	60
Figura 28 – Teste de acionamento das válvulas de pulverização utilizando controle por pressão e referência igual a 1 bar. . . . .	60
Figura 29 – Teste de acionamento das válvulas de pulverização utilizando controle por pressão e referência igual a 2 bar. . . . .	61
Figura 30 – Mensagem recebida pela ECU de controle ao início de cada rotina de teste. . . . .	61
Figura 31 – Diagrama esquemático da placa do transceptor de nível. . . . .	73

Figura 32 – Diagrama esquemático do circuito do driver de acionamento das válvulas solenoides. . . . .	74
Figura 33 – Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de envio de mensagens . . . . .	84
Figura 34 – Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de recepção de mensagens . . . . .	86



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Algumas especificações da camada física do padrão SAE J1939. Adaptado de: Sousa (2002). . . . .	36
Tabela 2 – Comprimento do barramento com relação à velocidade de transmissão para o padrão CANopen. Adaptado de: Natale (2008). . . . .	37
Tabela 3 – Variação de tempo entre a transmissão das mensagens para uma velocidade de 125 kbit/s e 8 bytes de dados . . . . .	57
Tabela 4 – Variação de tempo entre a transmissão das mensagens para uma velocidade de 250 kbit/s e 8 bytes de dados . . . . .	58
Tabela 5 – Carregamento do barramento para uma velocidade de 125 kbit/s . . .	58
Tabela 6 – Carregamento do barramento para uma velocidade de 250 kbit/s . . .	58
Tabela 7 – Sequência de testes realizados para o acionamento das válvulas de pulverização. A ilustração de cada teste pode ser conferida na Fig. 27.	59



# Lista de abreviaturas e siglas

AP	Agricultura de Precisão
GNSS	Global Navigation Satellite System
CAN	Controller Area Network
DIN	Associação Alemã de Normas Técnicas
SAE	Society of Automotive Engineers
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
ISO	International Organization for Standardization
DIS	Direction Injection System
CDIS	Central Injection System
BDIS	Bar Injection System
NDIS	Nozzle Injection System
EOF	End of Frame
ACK	Acknowledge
UCE	Unidade Central de Controle
ECU	Electronic Control Unit
PID	Proportional Integrative Derivative
OSI	Open System Interconnection
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CD	Collision Detection
NDBA	Non-Destructive Bitwise Arbitration
NRZ	Non Return to Zero
NBR	Nominal Bit Rate
TB	Tempo de Bit

TQ	Time Quantum
BRP	Baud Rate Prescaler
CRC	Cyclic Redundance Check
REC	Receive Error Counter
TEC	Transmit Error Counter
FTI	Força Tarefa Isobus
ECAN	Enhanced Controller Area Network



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Pulverizadores</b>	<b>22</b>
<b>1.2</b>	<b>Pulverizadores com injeção direta</b>	<b>24</b>
<b>1.3</b>	<b>Controladores para pulverizadores</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>REDES DE COMUNICAÇÃO E SEUS PROTOCOLOS</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Redes de computadores</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Redes de campo</b>	<b>32</b>
<b>2.3</b>	<b>Redes de comunicação baseadas no protocolo CAN</b>	<b>33</b>
2.3.1	Camada física	33
2.3.2	Camada de enlace	38
2.3.3	Deteção de erros	41
2.3.4	Mecanismo de acesso ao meio	41
2.3.5	Recepção de mensagens e filtros	42
2.3.6	Padrão ISO 11783	43
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE ACIONAMENTO VIA PROTOCOLO CAN</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Componentes e dispositivos do barramento CAN</b>	<b>45</b>
3.1.1	Controladores CAN	45
3.1.2	Transceptores de nível	47
<b>3.2</b>	<b>Plataforma de desenvolvimento</b>	<b>49</b>
3.2.1	Interligação dos módulos, <i>driver</i> de acionamento e as válvulas solenoides	50
3.2.2	Arquitetura das unidades de controle eletrônicas	50
<b>3.3</b>	<b>Sistema de desenvolvimento para ensaios e projetos de pulverizadores de agrotóxicos</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Sinais das linhas do barramento CAN</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Taxas de transmissão</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Carregamento do barramento em relação à quantidade de mensagens transmitidas</b>	<b>57</b>
<b>4.4</b>	<b>Acionamento das válvulas de pulverização agrícola</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusão</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>63</b>

REFERÊNCIAS	65
-------------	----

APÊNDICES	71
-----------	----

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DAS PLACAS UTILIZADAS	73
--	----

A.1	Diagrama elétrico da placa do transceptor de nível	73
-----	--	----

A.2	Diagrama elétrico da placa de acionamento	73
-----	---	----

APÊNDICE B – CÓDIGO EM LINGUAGEM C DA ECU DE ACIONAMENTO	75
--	----

APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS DO VI DA ECU DE CONTROLE	83
--	----

C.1	Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de envio de mensagens.	83
-----	--	----

C.2	Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de recepção de mensagens.	85
-----	---	----

# 1 Introdução

Com o surgimento de novas tecnologias no último século, equipamentos capazes de obter, armazenar e processar informações sobre as culturas, solos, aspectos climáticos permitiram que se pudesse estudar o desenvolvimento e a distribuição de plantas daninhas, assim se tornou possível aplicar o insumo agrícola de forma a visar a otimização do processo, o que evita o desperdício e aumenta a produção, podemos definir a Agricultura de Precisão (AP) como a união desses fatores ([ANTUNIASSI, 1999](#)).

Com a evolução da AP, hoje em dia estão presentes, além de controladores e sensores, outros elementos da eletrônica na agricultura, como computadores de bordo e sistemas de navegação global por satélite (GNSS, do inglês), entre outros. Esses elementos, por muitas vezes, são instalados na cabine do operador para facilitar seu manuseio, contudo, acabam por gerar uma grande quantidade de fiação, conforme ilustra a Fig. 1.

Uma alternativa encontrada para diminuir a quantidade de fiação na cabine veio de uma invenção dos anos 80, as redes de comunicação com protocolo Controller Area Network (CAN) ([BOSCH, 1991](#)). O protocolo foi desenvolvido por Robert Bosch para uso em carros e ganhou grande popularidade devido a sua robustez, hoje variações do protocolo podem ser encontrados nos mais diversos segmentos, como é o caso da agricultura.



Figura 1 – Quantidade excessiva de fiação na cabine de um trator em virtude dos inúmeros equipamentos instalados. Fonte: [Nissen \(2008\)](#).

Na europa, na década de 80, a Associação de Normas Alemã, DIN, iniciou a elaboração da norma DIN9684, um conjunto de especificações baseadas no protocolo CAN para utilização no meio rural. Na América, um pouco mais tarde, na década de 90, deu-se início ao desenvolvimento da norma SAE-J1939, pela *Society of Automotive Engineers*, ou SAE, também baseada no protocolo CAN para a padronização do motor e da transmissão (*powertrain*).

Embora o ganho com a diminuição da fiação presente seja importante, ele não é único. Com a entrada do protocolo CAN nos veículos e implementos rurais, permitiu-se que equipamentos ainda mais sofisticados pudessem adentrar no meio agrícola.

Essa invasão tecnológica no setor acarretou uma necessidade de padronização na comunicação entre esses dispositivos, com o intuito de facilitar a manutenção e instalação de novos componentes ao barramento. Houve uma união de forças entre empresas e grupos de pesquisas, associações, como a SAE e a DIN e da *International Organization for Standardization*, ISO, para a elaboração de uma norma, a ISO11783, conhecida por ISOBUS, com o intuito de padronizar a comunicação no meio rural. No Brasil existe a chamada Força Tarefa ISOBUS Brasil, uma união de pesquisadores e representantes da indústria de tratores que buscam reunir fornecedores de serviços e equipamentos da área agrícola para orientar os interessados no desenvolvimento e implementação de sistemas de controle e automação para máquinas agrícolas baseadas nesse padrão.

O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de comunicação baseado no protocolo CAN para o controle e acionamento de válvulas, permitindo a aplicação à taxa variada em um protótipo de pulverizador agrícola.

## 1.1 Pulverizadores

Uma das formas de aplicação do agrotóxico é a pulverização, onde o líquido é forçado pela energia hidráulica a atravessar um pequeno orifício formando uma lâmina que se desintegra dando origem às gotas (BOLLER; RATEANO, 2011).

Os pulverizadores podem ser manuais ou motorizados. Os manuais propiciam uma aplicação localizada e com economia, mas de pequeno porte, já que exigem uma grande quantidade de operadores. Os pulverizadores motorizados ainda podem ser divididos em outros tipos, como os pulverizadores de barra (PONTELLI, 2012). Exemplos desses dois tipos de pulverizadores são exibidos na Fig. 2.

As barras são equipadas com válvulas e pontas de pulverização. As válvulas são responsáveis por ativar a alimentação da barra com a calda que consiste da mistura do agroquímico com a água. As pontas de pulverização, ou bicos, constituem uma das partes mais importantes do pulverizador, aquelas são responsáveis por gerar as gotas pela fissão



(a) Pulverizador manual. Fonte: [Jacto \(2015\)](#).



(b) Pulverizador motorizado. Fonte: [Pulverizadores \(2015\)](#).

Figura 2 – Pulverizadores agrícolas.



Figura 3 – Válvulas da série QJS da Teejet. Fonte: [Teejet \(2015\)](#).

do feixe de água. A Fig. 3 exibe um exemplo de uma válvula da fabricante Teejet. Na Fig. 4a pode-se ver um exemplo de uma ponta de pulverização, também da fabricante Teejet, e na Fig. 4b é possível ver a representação da fissão do feixe de água.

A pulverização, quando considerada a aplicação localizada, pode ser realizada de duas maneiras. A primeira maneira é baseada em mapas, enquanto que na segunda se faz uso de sensores ou câmeras digitais para a detecção das plantas invasoras.

Os mapas de prescrição são constituídos de três dados: latitude, longitude e taxa de aplicação. Os dados latitude e longitude são obtidos por sistemas GNSS. Assim, cada área possui uma dosagem específica para aplicação, possibilitando a aplicação localizada do agrotóxico, que possibilita uma economia da ordem de 20 a 90% de herbicida, chegando a

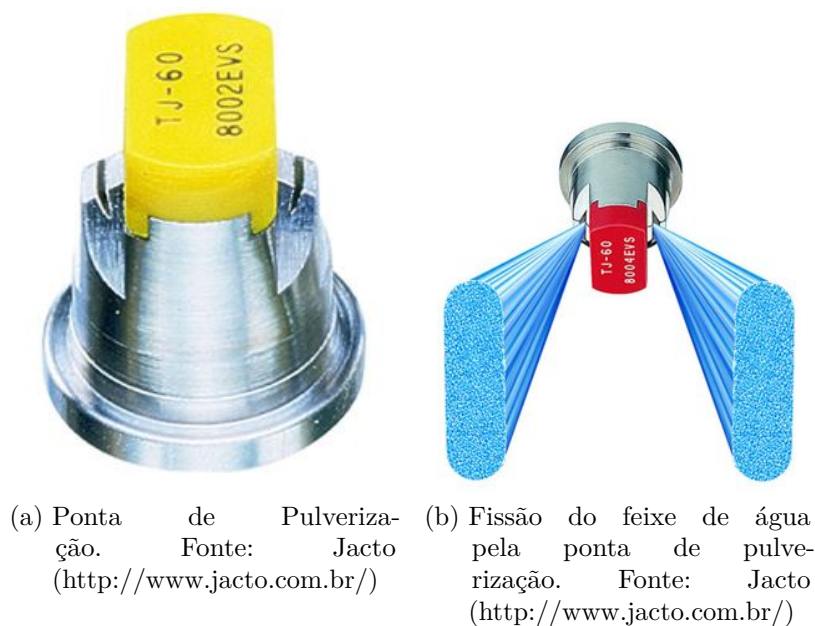


Figura 4 – Pontas de pulverização.

um controle de 98% das plantas invasoras (TIMMERMAN; GERHARDS; KÜHBAUCH, 2003; DICKE; KÜHBAUCH, 2006; GERHARDS; OEBEL, 2006).

O uso de sensores permite a análise em tempo real para a detecção da praga (BAIO; ANTUNIASSI, 2004). Para isso são utilizadas câmeras digitais e sensores. O uso desse tipo de sistema se torna difícil devido ao tempo de resposta e à constante calibração dos componentes, uma vez que a própria cor do solo pode atrapalhar a análise.

Por ser um produto tóxico, é desejável que haja um maior controle sobre a aplicação do agrotóxico, o que é permitido pela AP, assim podemos dizer que existe uma tendência da adoção da AP e suas técnicas.

## 1.2 Pulverizadores com injeção direta

O uso de pulverizadores com Injeção Direta, do inglês Direct Injection System (DIS), se caracteriza pelo uso de diferentes reservatórios para o agroquímico e para o diluente e começaram a ser desenvolvidos entre a década de 70 e 80 (PECK; ROTH, 1975; VIDRINE et al., 1975; LARSON; KUHLMAN; TENNEYCK, 1982; REICHARD; LADD, 1983; GEBHARDT; KLIETHERMES; GOERING, 1984; CHO; MARLEY; BAKER, 1985; KOO; YOUNG; KUHLMAN, 1996). Diferente do método convencional, a mistura para a formação da calda é realizada no momento da aplicação, o que traz vantagens em relação ao método convencional (VONDRICKA; LAMMERS, 2009; BODE; BRETTHAUER, 2008).

Como não há necessidade do preparo prévio da calda, o operador não fica sujeito ao contato com o agroquímico, evitando danos à saúde, uma vantagem significativa em



consideração à grande preocupação com o manejo desse tipo de produto por parte dos órgãos responsáveis e pelo próprio operador.

Outra vantagem é a flexibilidade. Uma vez que a calda não precisa ser preparada previamente, tem-se a possibilidade de realizar a aplicação de mais de um agroquímico sem ter que parar o processo.

A possibilidade de aplicação à injeção direta ainda permite que a concentração da calda seja controlada durante a aplicação variando-se a concentração do agrotóxico presente na mesma, uma vantagem, já que diferentes tipos de erva daninha necessitam de diferentes concentrações do agrotóxico, por exemplo.

Os DIS podem ser classificados de acordo com o local onde é feita a injeção da calda. Segundo [Vondricka, Hloben e Lammers \(2007\)](#) pode-se classificá-los em três tipos: Sistemas com Injeção Direta Central (CDIS), Sistema com Injeção nas Barras de Seção (BDIS) e sistemas com injeção nos bicos (NDIS). Os três sistemas são ilustrados na Fig.5.

- CDIS: Nesse sistema tem-se a injeção do agroquímico antes da bomba de pulverização ou depois da mesma, na seção de barra. O sistema apresenta atraso de transporte devido a distância entre a injeção do produto e as pontas de pulverização ([WALKER; BANSAL, 1999](#); [SUDDUTH; BORGELT; HOU, 1995](#)).
- O Sistema BDIS: Cada seção de barra possui um sistema para injeção do agroquímico. Devido à proximidade com as pontas de pulverização, tem-se um menor atraso ([OERKE et al., 2010](#)).
- O sistema NDIS: A injeção do agroquímico é realizada diretamente no bico de pulverização. Devido à proximidade com o ponto de aplicação, esse sistema é o que possui menor atraso em relação aos outros dois, em contrapartida, isso gera problemas em relação à homogeneidade da mistura ([ROCKWELL; AYERS, 1996](#); [ZHU et al., 1998](#)).

O custo de implantação de cada um dos sistemas acima varia. O sistema mais simples e, portanto, com preço mais acessível é o CDIS, enquanto que a tecnologia necessária para a implantação do sistema NDIS torna seu preço menos acessível ([LAMMERS; VONDRICKA, 2010](#); [MERCALDI, 2012](#)).

## 1.3 Controladores para pulverizadores

Sistemas eletrônicos estão presentes em praticamente todos os lugares hoje em dia, a agricultura não é uma exceção. Quando se pensa em taxa variável, automaticamente se pensa no controle desse processo.

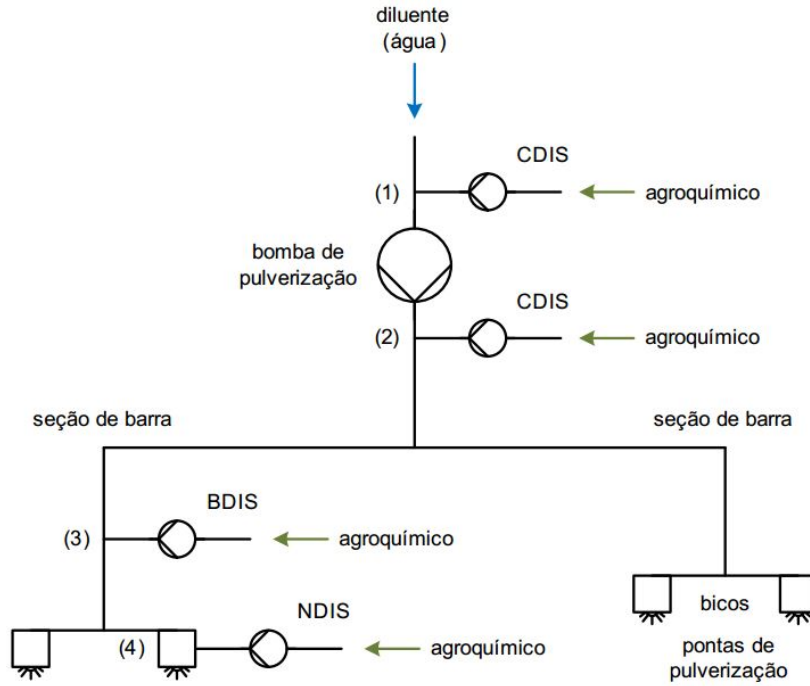


Figura 5 – Classificação dos DIS de acordo com o local onde é injetada a calda. Retirado de Mercaldi (2012).

Os controladores mais simples são aqueles compostos por termos proporcionais, integrativos e derivativos (PID), que trabalham com o sinal de erro gerado pela diferença entre a referência desejada e a resposta medida (OGATA, 2003).

Basicamente o controlador, no caso da aplicação à taxa variável, trabalha com os sinais provenientes de sensores de vazão, pressão e com a velocidade de aplicação do atuador. Os dados de referência para a vazão são obtidos a partir através do mapa de prescrição, aquelas por sua vez são calculadas pela Eq. 1.1 abaixo (BOLLER; RAETANO, 2011):

$$Q_{F_{ref}} = \frac{RVlb}{60000} \quad (1.1)$$

em que R é a taxa de aplicação dada em  $l/ha$ , V a velocidade do aplicador, em  $Km/h$ , lb o comprimento da barra, dado em  $cm$ , 60000 uma constante para correção das unidades e Q a referência da vazão, dada em  $l/min$ .

Com os valores medidos e a referência de vazão é possível a implementação de um controlador em malha fechada para regular a taxa de aplicação. Um sistema de controle do tipo PID para controlar a vazão do agrotóxico foi proposto por Frost (1990) e Way et al. (1992) propôs um sistema de controle do tipo proporcional com o mesmo objetivo. Em ambos os procedimentos foram verificados resultados satisfatórios.

Além das técnicas mais simples de controle, outras formas de controle mais sofis-



ticadas foram implementadas, como o uso de estratégias de controle adaptativo e redes neurais, por [Munack, Buning e Speckmann \(2001\)](#) e [Ulson \(2002\)](#), respectivamente.

[Mercaldi \(2012\)](#) utilizou um protótipo de um pulverizador com injeção direta para avaliar o desempenho um controlador PID tradicional e um controlador PD + I adaptativo fuzzy.

[Felizardo \(2013\)](#) realizou o controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta utilizando uma estratégia de antecipação das taxas de aplicação, para evitar a subaplicação e reduzir os erros de aplicação de agrotóxicos.



## 2 Redes de comunicação e seus protocolos

Este capítulo tem por objetivo introduzir o conceito de redes de comunicação. Na primeira seção tem-se os conceitos básicos sobre redes de Computador. Na segunda seção será introduzido o conceito redes de campo, e por fim, na última seção tem-se as redes de Comunicação CAN (do inglês, Controller Area Network) e suas particularidades.

### 2.1 Redes de computadores

Surgindo entre as décadas de 60 e 70, as redes de computadores podem ser entendidas como conjunto de computadores e circuitos elétricos, analógicos e/ou digitais e programas computacionais de interface, que permitem a comunicação entre esses computadores através de um ou mais meios físicos para a programação de informação ([SOUSA, 2002](#)).

A transmissão de dados na rede ocorre através de quadros ou pacotes. O quadro possui a informação a ser transmitida e tem tamanho limitado.

As redes de computadores são organizadas em camadas, seguindo o modelo Open System Interconnect (OSI), criado em 1970. Esse modelo de padrão de organização internacional (ISO, das iniciais em inglês) foi criado para padronizar os protocolos de comunicação. Essa arquitetura divide as redes de computadores em 7 camadas. Cada uma dessas camadas tem por função fornecer serviços às camadas adjacentes. São as camadas Física, Enlace, Rede, Transporte, Sessão, Apresentação e Aplicação. Uma breve descrição de cada camada é dada abaixo ([KUROSE; ROSS, 2006](#)).

- Camada física: Mais inferior do modelo. Tem por objetivo a movimentação de dados brutos não estruturados através de um meio físico. Nessa camada são definidos importantes elementos como: delimitação de quadros, tempo de bit, níveis de tensão que serão utilizados, entre outros.
- Camada de enlace: Tem por função a detecção e correção de erros que possam vir a ocorrer na camada física. Também é responsável pela coordenação da recepção e transmissão de dados. O limite dos quadros é criado e reconhecido nessa camada.
- Camada de rede: Controla as operações de sub-rede. É responsável por decidir qual caminho os quadros devem seguir com base nas condições da rede. Nas operações de sub-rede podemos incluir: Fragmentação de quadros e mapeamento de endereços lógicos. Na fragmentação, a camada decide se o tamanho do quadro recebido ou enviado excede o do quadro que o sistema pode receber, em caso afirmativo, ela o

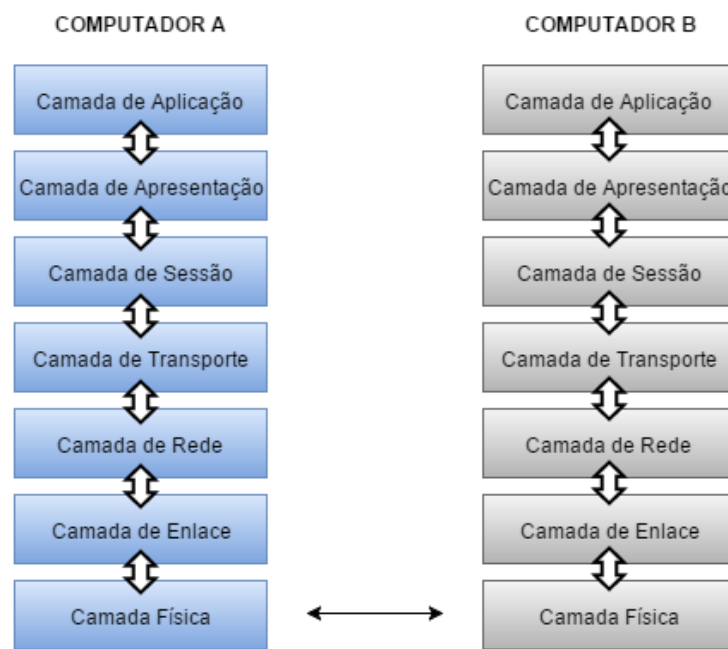


Figura 6 – Modelo OSI: Comunicação entre dois sistemas de diferentes arquiteturas.

fragmenta para envio e o reconstrói no destino. O mapeamento é responsável por converter os endereços lógicos em físicos.

- Camada de transporte: Garante que as mensagens sejam entregues sem erros, na sequência adequada.
- Camada de sessão: Responsável por estabelecer a sessão entre estações diferentes.
- Camada de apresentação: Considerada o tradutor da rede. É responsável por tratar dos dados para que eles sejam utilizados na camada de Aplicativo. Conversões de caracteres e criptografia são exemplos das funções dessa camada.
- Camada de aplicativo: É a camada superior da rede onde o usuário pode acessar os serviços de rede. Comunicação entre processos, mensagens eletrônicas e terminais virtuais são exemplos de funções dessa camada.

A vantagem do uso do modelo OSI está na possibilidade de comunicação entre computadores de diferentes arquiteturas, como pode ser visto na Fig. 6. Cada camada se comunica com sua equivalente no outro sistema utilizando diretivas genéricas e por meio da camada física a informação é levada até a camada correspondente. O conjunto de regras com que as camadas equivalentes se comunicam é denominado Protocolo (KUROSE; ROSS, 2006).

Embora a ISO determine 7 camadas para o modelo OSI, não se faz necessário o uso de todas, ficando a critério do desenvolvedor determinar a importância ou não da

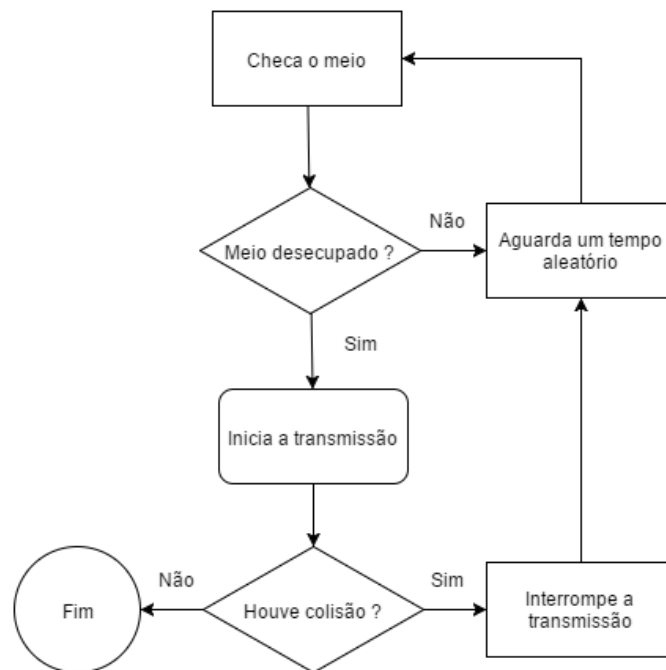


Figura 7 – Fluxograma da organização do algoritmo de funcionamento do CSMA.

camada para o projeto. A internet, por exemplo, utiliza apenas 5 das 7 camadas (físico, enlace, rede, transporte e aplicação), deixando as outras camadas como opções.

Uma rede pode ser composta por vários computadores transmitindo dados, denominados nós. Os dados transmitidos por um computador são entregues a todos os nós da rede, assim, é natural que ocorra erros na transmissão dos pacotes devido às colisões desses. Dessa forma foi necessário o desenvolvimento de um protocolo para o controle desse processo, o Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD).

O CSMA/CD é um protocolo de acesso múltiplo que permite o controle dos pacotes transmitidos. De maneira simplificada, o protocolo funciona da seguinte forma: Se um nó está transmitindo, outro nó não deve transmitir até que a transmissão daquele tenha cessado. Caso um nó esteja transmitindo e outro começa uma transmissão, aquele cessa a transmissão e aguarda até que possa transmitir novamente. Dessa forma, garante-se que todos os pacotes enviados sejam recebidos sem erro. O fluxograma da Fig 7. exemplifica o funcionamento do CSMA em um meio de transmissão (KUROSE; ROSS, 2006).

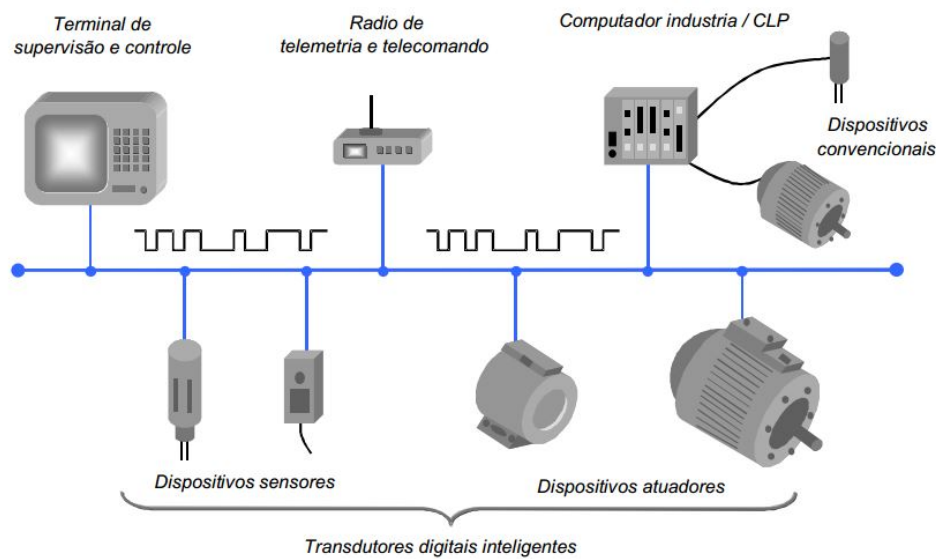


Figura 8 – Dispositivos conectados a um mesmo barramento de uma rede de campo. Retirado de: [Sousa \(2002\)](#).

## 2.2 Redes de campo

Redes de campo (em inglês, Field Bus) são nomes genéricos para descrever os protocolos utilizados nas redes de computadores industriais para comunicação e controle de processos em tempo real. O protocolo CAN é um exemplo.

Os dispositivos são conectados a um barramento único compartilhado. Entende-se por barramento os conjuntos de cabos, conectores e dispositivos de potência para interconectar e promover a comunicação entre dispositivos ([SOUSA, 2002](#)).

Dispositivos eletrônicos, como alguns sensores, operam no padrão TTL (do inglês, Transistor-Transistor Logic). Esse padrão requer que cada dispositivo esteja trabalhando no nível do controlador, em uma malha de corrente. Agora cada dispositivo é conectado ao barramento e seus dados são acessados de acordo com a necessidade do controlador. Com isso diminui-se a quantidade de fios necessários, já que o dispositivo não mais necessita estar conectado diretamente ao controlador, apenas ao barramento. A detecção de erros foi outro fator melhorado pela introdução do barramento. Caso um dispositivo apresente problemas, este é facilmente detectado e não compromete a comunicação dos outros dispositivos.

A Fig. 8 mostra um exemplo de rede de campo com dispositivos compartilhando o mesmo barramento. Atualmente, devido a seu sucesso, as redes de campo sofreram modificações e são encontradas nos mais diversos ramos. Um dos exemplos é o protocolo CAN.

## 2.3 Redes de comunicação baseadas no protocolo CAN

As redes de comunicação CAN foram desenvolvidas na década de 80 por Robert Bosch. Surgiram devido à necessidade de padronização da comunicação entre os dispositivos eletrônicos dos carros. Suas características são baseadas nos conceitos de redes de campo.

Tamanho sucesso das redes CAN permitiu que se expandissem, não se limitando apenas aos carros. Hoje em dia, variações do protocolo podem ser encontradas nos mais diversos ramos, como tratores, caminhões e ônibus.

A rede possui características interessantes para aplicações que exigem robustez. A transmissão é realizada por dois fios, o que facilita a implementação. O sistema de acesso ao meio é baseado no sistema CDMA/CD das redes de computadores e é bastante eficiente. O conceito de barramento das redes de campo foi mantido, o que permite fácil instalação e manutenção de dispositivos. A velocidade máxima de transmissão pode chegar a 1 Mbit/s. O padrão ainda permite que as mensagens transmitidas possuam diferentes prioridades de transmissão.

Seguindo o modelo OSI, aplicado às redes de computadores, a rede CAN também é organizada em camadas. As camadas mais inferiores do protocolo, Física e de Enlace, são definidas pelo protocolo, as outras são definidas de acordo com as necessidades da aplicação. Dessa forma, tem-se definido o tempo e codificação de bit, e sincronização.

### 2.3.1 Camada física

A camada física é a camada mais inferior do modelo OSI e nessa seção serão definidas suas características.

#### Tempo de bit e sincronização

Nessa seção serão definidos elementos como o tempo de bit e o sistema de sincronização utilizado pela rede. O padrão dos sinais na rede é digital com codificação Non Return to Zero (NRZ). Esse tipo de padrão oferece grande estabilidade a ruídos externos, já que o sinal não apresenta muitas transições. O zero normalmente representa o estado dominante, o que acontece no padrão CAN.

O protocolo CAN utiliza as bordas do sinal para realizar resincronização, caso se transmita uma sequência grande de 0's ou 1's, essa sincronia pode ser comprometida. Um interessante aspecto utilizado para resolver esse problema é o *bit stuffing*.

A técnica de *bit stuffing* consiste em inserir um sinal complementar ao do barramento a cada 5 bits do mesmo tipo transmitidos. Esses bits são inseridos pelo próprio nó transmissor e são reconhecidos pelo nó de destino, que os remove (NATALE, 2008).

Chama-se taxa nominal de bits (NBR, das iniciais em Inglês), a taxa com que os

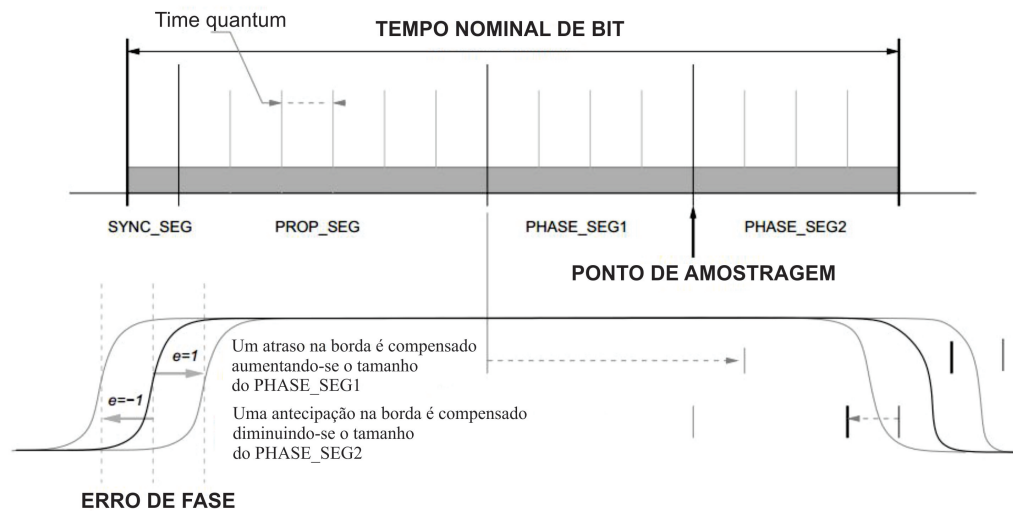


Figura 9 – Tempo de bit. Adaptado de: [Natale \(2008\)](#).

dados são transmitidos pela rede por segundo, sem necessidade de resincronização. É necessário que todos os nós da rede operem na mesma NBR, do contrário pode ocorrer perda de sincronismo e os dados não serão recebidos ou podem ser mal interpretados. O inverso da NBR é chamado tempo de bit (TB). O maior NBR por definição é 1 Mbit/s, assim, o menor TB é 1  $\mu s$ .

O TB é composto por quatro segmentos (Fig. 9): O de sincronização (SYNC\_SEG), o de propagação (PROP\_SEG), os de fase (PHASE\_SEG1 e PHASE\_SEG2) e o ponto de amostragem (SAMPLE\_POINT). Uma breve descrição de cada um pode ser encontrada abaixo ([NATALE, 2008](#); [IBRAHIM, 2014](#)).

- Segmento de sincronização (SYNC\_SEG): Utilizado para sincronizar os vários nós da rede. Espera-se que uma borda esteja dentro desse segmento.
- Segmento de propagação (PROP\_SEG): Utilizado para compensar atrasos físicos dentro da rede.
- Segmentos de fase (PHASE\_SEG1 e PHASE\_SEG2): Funcionam como buffers e são utilizados para compensar erros de fase. Podem ser encolhidos ou esticados para resincronizar a posição do segmento de sincronização. Na Fig. 9 pode-se ver dois exemplos de correção, um para antecipação da borda ( $e = -1$ ) de sincronia e outro para atraso ( $e = +1$ ).
- Ponto de amostragem (SAMPLE\_POINT): É o ponto de amostragem é o ponto onde o nível do barramento está pronto para ser interpretado como nível de bit. Um controlador CAN pode ser configurado para amostrar o barramento mais de uma vez antes de fornecer uma leitura.



Cada segmento que compõem o tempo de bit é formado por segmentos chamados *time quantum* (TQ), que são a unidade básica de tempo no barramento. Assim, o tempo de bit pode ser determinado de acordo com a quantidade de TQ por segmento.

- Segmento de sincronização: Composto por 1 TQ.
- Segmento de propagação: Composto de 1 a 8 TQ's.
- Segmentos de fase: Composto de 1 a 8 TQ's.
- Ponto de amostragem: Composto de 2 a 8 TQ's.

Assim o ponto de amostragem é definido de acordo com os tempos programados para os segmentos, de forma a garantir que os nós realizem a amostragem do barramento em tempos iguais.

De acordo com a formação dos segmentos do TB, pode-se ter tempo de bit com mínimo de 8 e no máximo 25 TQ's. O tempo de bit então pode ser calculado de acordo com :

$$TB = TQ(SYNC\_SEG + PROP\_SEG + PHASE\_SEG1 + PHASE\_SEG2) \quad (2.1)$$

O TQ é derivado da frequência do oscilador utilizado, e pode ser obtido por:

$$TQ = 2(BRP + 1)/F_{OSC} \quad (2.2)$$

em que TQ é dado em microsegundos, BRP é um fator de escala, que pode ser um número inteiro entre 0 e 63,  $F_{OSC}$  é a frequência do oscilador.

As redes CAN trabalham com dois tipos de sincronização, *Hard Synchronization* e *Resynchronization*. A primeira atua no início do *frame*, quando esse muda o estado do barramento. As mensagens enviadas pela rede CAN serão definidas como frames na sessões seguintes. A resynchronization atua durante a transmissão, ajustando os PROP\_SEG1 e PROP\_SEG2 para corrigir erros de fase que possam ocorrer.

### Padrão ISO 11898

Mencionado em Bosch (1991), o padrão ISO 11898 não define outras características, como cabos e conectores, ou níveis de tensão e corrente pelo barramento para a camada física, deixando ao desenvolvedor a liberdade para decidir os melhores componentes para sua aplicação.

Para preencher as lacunas surgiram novos padrões baseados no CAN de Bosh, como é o caso do ISO 11898. O padrão foi dividido em 3 partes: ISO 11898-1, ISO 11898-2 (high speed CAN) e ISO11898-3 (low speed CAN) ([DIEGUES, 2014](#); [NATALE, 2008](#)).

O padrão mais utilizado é ISO 11898-2. Essa versão permite transmissões com velocidade de até 1 Mbit/s para um barramento com comprimento de até 30 metros. A transmissão é realizada por meio de dois fios e a quantidade de nós definida pela carga no barramento. A impedância entre as linhas, chamadas de CAN\_H e CAN\_L, é de 120  $\Omega$  ([NATALE, 2008](#)).

O ISO 11898-3, também chamado de Low Speed CAN, é destinado a aplicações de baixa velocidade. É tolerante à falta, podendo continuar a transmissão mesmo com o rompimento de uma das linhas de transmissão. A velocidade máxima de transmissão pode chegar a 125 kbit/s e um máximo de 32 nós.

### Padrão SAE J1939

Baseado no ISO 11898-2, o padrão SAE J1939 foi desenvolvido para aplicações em veículos de terra de grande porte, como caminhões, ônibus e tratores (Souza, 2002). É definido como meio de transmissão um par de fios blindados, com uma velocidade máxima de transmissão de 250 Kbit/s. O barramento é terminado por um resistor para diminuir as reflexões. O padrão permite seções múltiplas conectadas ao barramento por meio de pontes. As pontes tem por função isolar as seções em casos de falhas elétricas. O número máximo de nós é definido como 30 e o comprimento máximo do barramento como 40 metros, a Tabela 1 resume algumas características do padrão ([FRITZ KÜBLER GMBH, 2009](#); [SOUSA, 2002](#)).

Tabela 1 – Algumas especificações da camada física do padrão SAE J1939. Adaptado de: [Sousa \(2002\)](#).

Item	Definição
Barramento	Par diferencial
Velocidade (Kbit/s)	250
Máximo de nós	30
Comprimento do barramento (m)	40
Terminação	Resistor
Cabo	Par trançado com blindagem conectada ao terra
Conector	3 pinos sem blindagem

### Topologia do barramento e velocidade de transmissão

O barramento consiste de um meio onde os dados transitam e são acessados pelo nó. Esse barramento pode ser constituído por fios ou não, como em tecnologias *Wireless*. Como foi dito o padrão CAN adota o meio físico constituído por cabos e elementos de

potência para transmissão dos dados. Esses elementos incluem transceptores de nível, alimentação e terminações. Esse barramento pode ser ou não isolado (blindagem das linhas de transmissão).

A velocidade de transmissão dos dados é inversamente proporcional ao tamanho do barramento. Isso acontece devido ao atraso máximo aceitável que pode ocorrer na transmissão das mensagens. Esses atrasos podem ser: gerados pelo controlador CAN, por opto acopladores, por transceptores e pelo próprio cabo. Segundo [Natale \(2008\)](#), esses atrasos são da ordem de 50 a 62 ns para o controlador CAN; 40 a 140 ns para os optoacopladores; 120 a 250 ns para os transceptores de nível e cerca de 5 ns para o cabo. Dessa forma o maior fator limitante para o comprimento do barramento é o atraso gerado pelo transceptor de nível.

A Tabela 2 fornece uma relação entre o comprimento do barramento e a velocidade de transmissão para o padrão *CANopen* ([PFEIFFER; AYRE; KEYDEL, 2008](#)). Esse padrão também surgiu para preencher as lacunas de definições.

Tabela 2 – Comprimento do barramento com relação à velocidade de transmissão para o padrão CANopen. Adaptado de: [Natale \(2008\)](#).

Velocidade de transmissão (Kb/s)	Tempo de bit ( $\mu$ s)	Comprimento do barramento (m)
1000	1	25
800	1,25	50
500	2	100
250	4	250
125	8	500
62,5	16	1000
20	50	2500
10	100	5000

Analisando os dados da Tabela 2 percebe-se a relação inversa entre a velocidade de transmissão e o comprimento do barramento.

### Terminação do barramento

Os sinais transmitidos pelo barramento podem sofrer reflexão ao atingirem sua terminação. Uma das formas de se resolver esse problema é conectando um resistor equivalente à impedância nominal do cabo, essa ação é chamada casamento de impedância. Essa correção é necessária para que os níveis de tensão sejam interpretados corretamente pelos nós conectados ao barramento.

O padrão ISO 11898 requer um cabo com impedância nominal de 120  $\Omega$ , o que exige então que resistores de 120  $\Omega$  sejam conectados ao circuito. Um exemplo de terminação pode ser visto na Fig. 10.

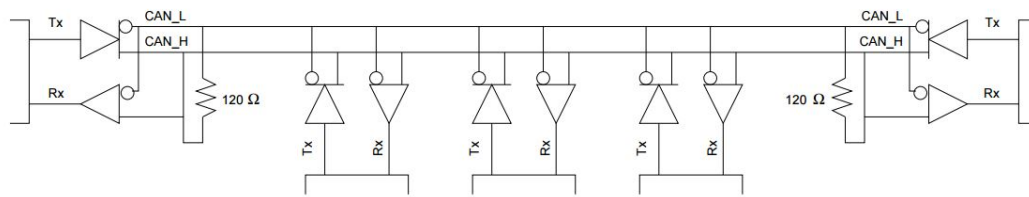


Figura 10 – Terminação de um barramento operando no padrão ISO 11898. Adaptado de: [Natale \(2008\)](#).

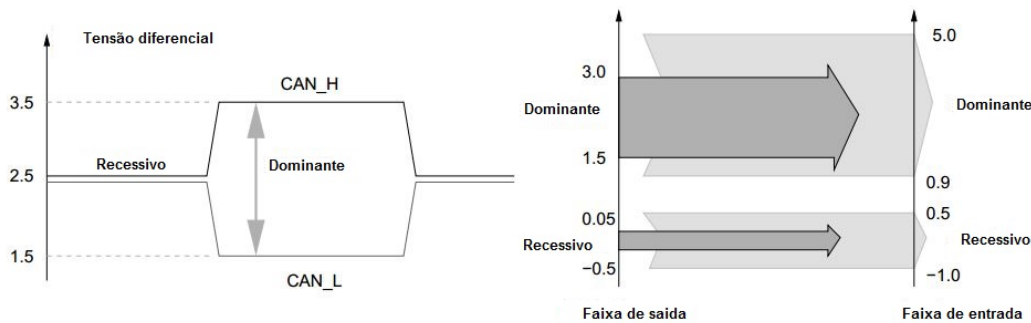


Figura 11 – Níveis de tensão para os estados recessivo e dominante. Retirado de: [Natale \(2008\)](#).

### Níveis de tensão

A rede CAN define dois estados lógicos: recessivo e dominante. Esses estados, no barramento, são representados por tensões. O padrão trabalha com tensões diferenciais utilizando suas duas linhas de transmissão. Um estado recessivo na linha de transmissão equivale ao 1 lógico, enquanto que um estado dominante na linha corresponde ao 0 lógico. Os níveis de tensão para cada caso são representados na Fig. 11 e interpretados abaixo. ([NATALE, 2008](#); [SOUSA, 2002](#); [DIEGUES, 2014](#)).

- Estado recessivo: O nível de tensão definido para o estado recessivo é 2,5 V. Uma tensão diferencial próxima a zero, sendo tolerado um valor mínimo de 0,55 V para a saída e 1,5 V para a entrada.
- Estado dominante: Para o estado dominante deve-se ter uma tensão de 3,5 V em CAN\_H e 1,5 V em CAN\_L, gerando uma tensão diferencial de 2 V. Existe uma tolerância entre 3 e 1,5 V (diferencial de 1,5 V) para saída e entre 5 e 0,9 V (diferencial 4,1 V) para a entrada.

### 2.3.2 Camada de enlace

A camada de enlace é agora dividida em duas camadas, a camada de objeto e de transferência. Essa se destina à detecção de erros, validação das mensagens, confirmar o

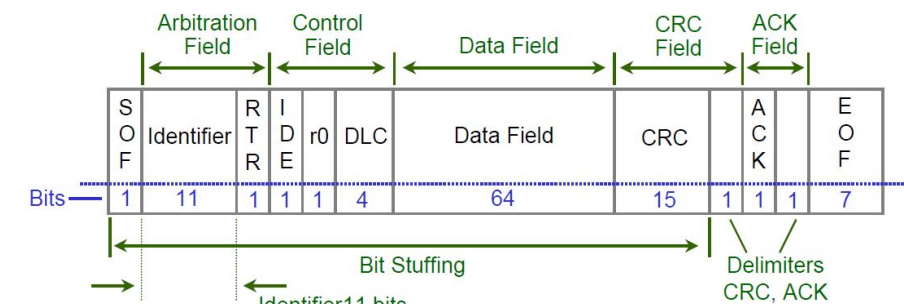
recebimento da mensagem (ACK), arbitragem do meio, montar os frames de mensagem e monitorar a taxa de transferência. A camada de objeto, por sua vez, se encarrega das mensagens propriamente ditas. Constata as mensagens que serão enviadas e decide quais das recebidas pelo nó serão utilizadas.

São definidas duas versões do padrão CAN pela Bosch, CAN 2.0A e CAN 2.0B. A diferença entre as duas versões está no tamanho do identificador de mensagens, sendo 11 bits para CAN 2.0A e 29 bits para o CAN 2.0B (BOSCH, 1991).

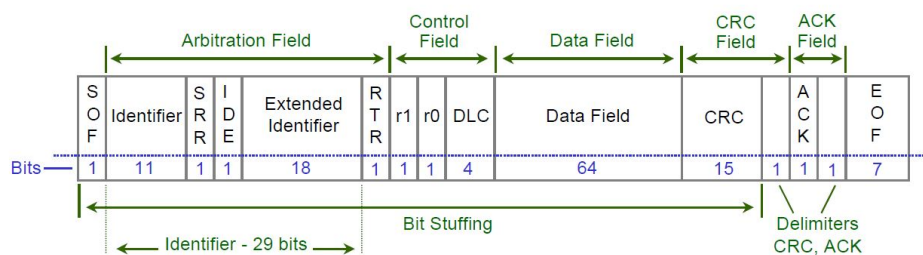
### Frames

Todas as mensagens transmitidas através do barramento CAN ocorrem através de *frames*, quadro ou datagramas, como também são chamados. É tarefa da camada de enlace aplicar os limites dos quadros às mensagens. São definidos 4 tipos diferentes de frames, cada um desempenha uma tarefa específica no barramento. Os tipos são: Dados, Remoto, Erro e Sobrecarga (NATALE, 2008).

- **Frame de dados:** Contém a informação a ser transmitida pelo barramento. A Fig. 12 mostra os campos que formam o frame de dados.



(a) Frame de dados CAN 2.0A.



(b) Frame de dados CAN 2.0B.

Figura 12 – Formato dos frames de dados para os padrões CAN 2.0A e CAN 2.0B. Retirado de: Sousa (2002)

A principal diferença entre os dois frames está no identificador. No padrão CAN 2.0A (Fig. 12a) ele é composto por 11 bits, enquanto que no CAN 2.0B (12b) ele é composto por 29 bits. Além do identificador, na versão estendida o bit IDE é

substituído por um bit reservado e nesse mesmo campo é adicionado o bit *Substitute Remote Request* (SRR), que é sempre recessivo para que o quadro padrão tenha maior prioridade na transmissão.

Os demais campos são definidos abaixo (BOSCH, 1991; SOUSA, 2002; GUIMARÃES, 2003; NATALE, 2008; DIEGUES, 2014)

- *SOF Field (Start of Frame Field)*: Formado por um bit dominante, caracteriza o início do *frame*.
  - *Arbitration Field*: Nesse campo está localizado o *Remote Transmission Request* (RTR). Esse é responsável por diferenciar um *frame* de Dados de um Remoto.
  - *Control Field*: Possui duas importantes funções. A primeira é definida pelo primeiro bit que o compõem, indicando se o *frame* é padrão ou estendido. A segunda é definida pelos quatro últimos bits que informam a quantidade de bytes do frame de dados.
  - *Data Field*: Formado por 8 bytes sendo os primeiros os mais significativos. É nesse *frame* que se encontra os dados a serem transmitidos pelo barramento.
  - *Cyclic redundancy Check (CRC)* : Utilizado pelos receptores para a detecção de erros na transmissão. Utiliza os bits que formam os quatro primeiros *frames* (SOF, *Arbitration Field*, *Control Field*, *Data Field*) e calcula um polinômio que fornece o código do CRC.
  - *Acknowledge Field (ACK)*: Utilizado para sinalizar que o quadro foi recebido. O nó que envia o quadro escreve um bit recessivo nesse campo, quando o nó de destino recebe o *frame*, ele sobrescreve esse campo com um valor dominante, indicando o recebimento.
  - *End of Frame Field (EOF)*: Como o nome diz, sinaliza o termino do *frame* e é composto por sete bits recessivos.
- **Frame remoto**: Utilizado para solicitar um quadro de dados com mesmo identificador do *frame* remoto enviado. Difere do frame de dados pelo Data Field sempre vazio e o RTR sempre com valor recessivo. O campo DLC presente no Control Field indica o tamanho da informação contida do quadro solicitado.
  - **Frame de erro**: *Frame* transmitido sempre que um erro é detectado por um nó. Esse *frame* não é como os outros, é apenas o resultado da sinalização de um erro.
  - **Frame de sobrecarga**: Empregado no controle de fluxo do barramento. Composto por uma sequência de seis bits dominantes, é utilizado para solicitar mais tempo depois da transmissão de um quadro de dados ou remoto, evitando que uma nova transmissão se inicie.

### 2.3.3 Detecção de erros

As redes CAN possuem um sistema de detecção de erro. São caracterizados cinco diferentes tipos de erro que podem acontecer na rede.

- *Bit error*: O bit transmitido pelo nó é diferente do lido na rede. Não é considerado um erro de arbitragem.
- *Stuff error*: Ocorre quando mais de cinco bits são transmitidos, violando a regra do bit-stuffing.
- *CRC error*: Ocorre se o CRC calculado pelo receptor difere do contido no *frame* de mensagem.
- *Form error*: Quando um bit de valor já definido tem seu valor diferente.
- *ACK error*: Quando não há confirmação de recebimento da mensagem pelo nó de destino.

Como dito anteriormente, o *error frame* não é um *frame* como os outros, mas sim um resultado da sinalização de um erro. Os erros são sinalizados via *flags*, que são acumuladas por dois contadores presentes em cada nó: *receiver error counter* (REC) e *transmit error counter* (TEC). O primeiro acumula os erros relacionados à recepção, enquanto que o segundo os erros de transmissão. Ambos contam no intervalo de 0 a 255.

O valor da *flag* de erro depende da gravidade do erro, podendo variar de 1 a 8. A condição do nó no barramento, com relação aos erros, é definida por três estados: *Error passive*, *Error active* e *Bus off*.

O *error active* força o nó a enviar seis bits dominantes pela rede, violando a regra do *bit-stuffing*, dessa forma todos os nós detectam essa violação e descartam a informação recolhida da transmissão desse nó. Um nó na condição Error Active funciona normalmente sem restrições na rede.

O *error passive* ocorre quando os contadores do nó estão acima de 127. O processo de transmissão e recepção continua normalmente, contudo, para qualquer erro na rede, o nó entende que foi causado por ele e portanto força uma violação do *bit-stuffing*.

A condição de *bus off* ocorre quando os contadores do nó atingem o valor de 255. Nessa situação ocorre o desligamento do mesmo da rede. O nó só volta a transmitir com a reinicialização de seu controlador CAN.

### 2.3.4 Mecanismo de acesso ao meio

O acesso ao meio ocorre segundo o protocolo Carrier Sense Multiple Access with Non-destructive Bitwise Arbitration (CSMA/NDBA) (DIEGUES, 2014). O CSMA, já



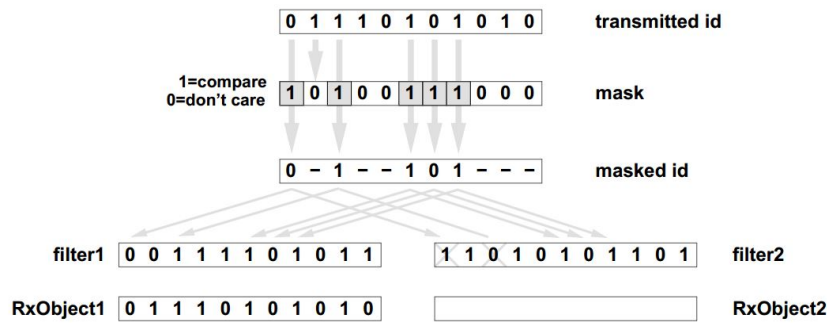


Figura 13 – Processo de aceitação ou rejeição de uma mensagem transmitida pelo barramento. Retirado de: di Natale (2008)

definido anteriormente, dita que os nós só podem transmitir com o barramento livre. Na transmissão, o nó com identificador de menor valor tem o direito de transmitir, então, se três nós disputarem o barramento com identificadores 0x10A, 0x30D e 0x106, o nó 0x106 transmitiria, enquanto os outros dois nós se tornariam receptores e aguardariam até que o barramento estivesse livre novamente.

### 2.3.5 Recepção de mensagens e filtros

Nas redes CAN, os nós não possuem identificadores, mas sim suas mensagens. Um nó pode transmitir mensagens com diferentes identificadores para cada tipo de dado. Por exemplo, um nó onde está conectado um motor, o mesmo pode enviar informações referentes à temperatura do óleo e velocidade, cada mensagem terá um identificador e esse será único na rede.

As mensagens transmitidas pelo barramento atingem todos os nós conectados a ele, esse conceito é denominado *multicast*. Cada nó possui um sistema de filtros e máscaras que é capaz de decidir se a mensagem deve ou não ser absorvida. Em caso positivo, ela é encaminhada a registradores chamados *RxObjects*. Comumente os controladores CAN possuem mais de um desses.

Para que a mensagem seja aceita ela deve passar pelas máscaras e filtros do controlador CAN. As máscaras definem quais bits serão analisados na mensagem para serem comparados ao filtro. São configuradas da seguinte forma: Um bit 0 na máscara indica irrelevância, ou seja, esse bit não será utilizado para comparação no filtro. Um bit 1 ativa a comparação do bit da mensagem com o filtro (NATALE, 2008). A Fig. 13 mostra o processo de comparação da mensagem com a máscara e os filtros.

A mensagem transmitida possui identificador 01110101010. A máscara aplicada é 10100111000, o que significa que o primeiro, o terceiro, o sexto, sétimo e oitavo bit da mensagem serão comparados ao filtro. O filtro 1 é caracterizado por 00111101011, enquanto que o 2 por 11010101101. Dessa forma, somente o *RxObject1* receberá a mensagem.



### 2.3.6 Padrão ISO 11783

Com a evolução da AP nas últimas décadas, cresceu o uso da eletrônica embarcada utilizada para automatizar tarefas agrícolas, contudo, essa praticidade fornecida pela tecnologia pode até mesmo atrapalhar o produtor. Cada fabricante adota um padrão para seu produto (tipos de cabos, conectores, protocolos para comunicação, entre outros), o que dificulta a comunicação entre os equipamentos.

O primeiro passo para solucionar esse tipo de problema foi a adoção do protocolo de comunicação CAN. Como já foi dito anteriormente, a robustez e facilidade de instalação de novos componentes foi um atrativo, contudo o protocolo ainda era muito aberto, permitindo que cada fabricante defina especificações próprias para os elementos não definidos do protocolo, como: conectores, cabos, velocidade de transmissão, máxima quantidade de nós, entre outros.

Segundo [Pereira \(2008\)](#), a ISO 11783 é um conjunto de definições, regras e procedimentos que permite a interconexão de entre unidades de controle de um trator e um implemento, sem que haja necessidade de se realizar a troca dos equipamentos eletrônicos responsáveis por essa comunicação, prolongando sua vida útil.

O protocolo surgiu da união de esforços entre grupos de pesquisa, empresas, as associações DIN, SAE, ASAE (American Society of Agricultural Engineers) e a International Organization for Standardization, a ISO, para geração de uma norma internacional denominada ISO 11783. No Brasil existe a Força Tarefa Isobus (FTI), um grupo formado por pesquisadores e representantes da indústria, que procurou aproximar fabricantes de máquinas e implementos agrícolas e fornecedores de sistemas eletrônicos aplicados a essas máquinas, com o objetivo de facilitar a aplicação das tecnologias por empresas e instituições nacionais ([INAMASU, 2013](#)).

Algumas das especificações do padrão ISO 11873 podem ser conferidas abaixo ([PEREIRA, 2008](#)):

1. Velocidade de transmissão de 250 kbit/s
2. Uso do protocolo CAN 2.0B com identificador estendido.
3. Comprimento máximo do barramento de 40 m por segmento.
4. Extensão do barramento através de pontes de segmentos.
5. Máximo de 30 nós por segmento.
6. Uso de cabo de par trançado, não blindado, 75  $\Omega$  de impedância, 2 fios para sinal CAN e 2 fios para alimentação do terminador ativo do barramento.



## 3 Sistema de acionamento via protocolo CAN

O presente capítulo descreve os componentes e dispositivos utilizados na implementação de redes CAN, bem como a plataforma de desenvolvimento utilizada.

### 3.1 Componentes e dispositivos do barramento CAN

Inicialmente nesta seção são apresentados os controladores CAN. Em seguida é descrito o funcionamento dos transceptores de nível responsáveis pela implementação da camada física do protocolo CAN. Finalmente, são exibidos dois dispositivos, o NI-8473 (NI, 2006) e *CAN Breakout Box* (NI, 2014), ambos da empresa National Instruments.

#### 3.1.1 Controladores CAN

Os controladores CAN são responsáveis por coordenar as operações de rede, realizando as tarefas das camadas física e de enlace (PIRES, 2005). São: arbitragem do meio, montagem dos *frames*, cálculo do polinômio que fornece o valor do CRC, detecção e sinalização de erros, *bit-stuffing*, ACK. Maiores detalhes sobre essas tarefas podem ser vistas nas Seções 2.3.1 e 2.3.2.

A seguir são descritos dois controladores CAN, o Módulo eCAN (MICROCHIP, 2012) e o Philips SJA1000 (PHILIPS, 2000).

##### Módulo eCAN

Internamente ao microcontrolador PIC18f46k80 da Microchip está presente um controlador CAN denominado *Enhanced Controller Area Network* (eCAN), compatível com os padrões CAN 1.2, CAN 2.0A ou B (2.3) definidos por Bosch (1991).

O controlador CAN possui 6 *buffers* programáveis para transmissão e recepção de mensagens. Pode-se configurar até 16 diferentes filtros, que podem ser combinados a 6 diferentes tipos de máscara. São suportados *frames* de data, remotos, de erro e de sobrecarga.

Os pares de pinos RB2/RB3 do microcontrolador são utilizados para transmissão e recepção de dados, respectivamente. Os pinos RC6/RC7 podem ser utilizados com mesma finalidade.

O controle do módulo eCAN é realizado via registradores. O controlador define automaticamente os bits *Tri-State Register* (TRIS, do inglês, é responsável por definir um

pino do microcontrolador como saída ou entrada, onde utiliza-se nível de lógico 0 para saída e 1 para entrada) para RB2 e RC6, contudo é necessário que seja definido o bit TRIS para RB3 e RB7 (valor 1 lógico, nesse caso).

O controlador possui dois modos de operação principais, *Normal Mode* e *Config Mode*. Para se alterar valores dos registros é necessário que se acesse o *Config Mode*. Para que o módulo trabalhe normalmente, desempenhando as funções de um controlador, é necessário que se selecione o modo de operação *Normal Mode*.

As informações sobre o *status* de mensagens e erros devem ser lidas diretamente nos registradores responsáveis. Configurações dos frames, máscaras e filtros são realizadas da mesma forma.

Os outros modos possíveis de operação para o controlador são ([MICROCHIP, 2012](#); [PEREIRA, 2008](#))

- Desabilitado.
- Escuta: Nesse modo o controlador apenas recebe mensagens, mesmo que essas possuam erro.
- ECO: Transmissão interna, sem necessidade de conexão com o meio físico.
- Reconhecimento de erro: Modo similar ao Escuta, contudo o controlador pode enviar mensagens.

### Controlador Philips SJA1000

O SJA1000 ([PHILIPS, 2000](#)), é um controlador CAN compatível com o padrão CAN 2.0B, permitindo o uso de identificador padrão ou estendido e transmissão em até 1 Mbit/s.

Possui um registrador de 64 bytes para o armazenamento de mensagens, que pode ser visto na Fig. 14. As mensagens ficam armazenadas nesse registrador até alcançarem a janela de *buffer* de recepção. O controlador também possui contadores de erro com limites programáveis e com função de interrupção. O *buffer* para transmissão é único.

O controlador pode operar nos modos: Normal, PeliCAN, Escuta e Teste. No modo normal o SJA1000 herda as características de seu predecessor, o PCA82C200 ([PHILIPS, 1990](#)), podendo trabalhar com possibilidade de multi mestre no barramento, 2032 diferentes identificadores para mensagens, tratamento de erros e velocidade de até 1 Mbit/s, contudo não suporta identificadores estendidos.

No modo PeliCAN o controlador pode trabalhar com identificador estendido ou padrão, possui dois filtros de aceitação, além das características do PCA82C200.

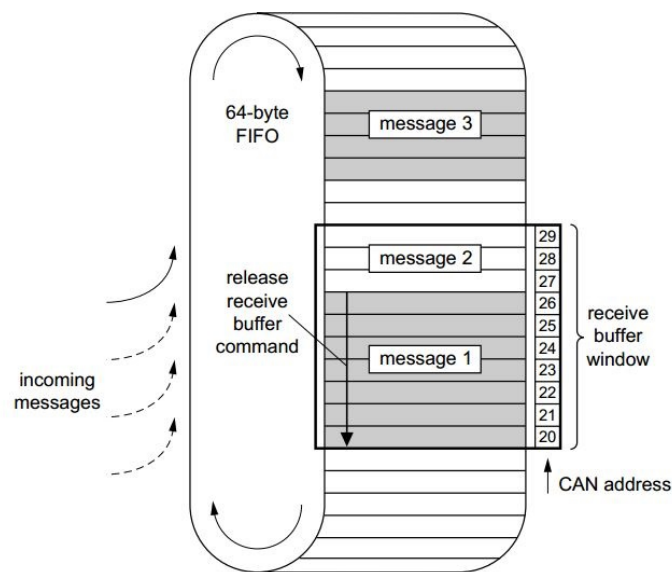


Figura 14 – Registrador responsável por armazenar as mensagens recebidas. A característica First Input First Output faz com que a primeira mensagem a entrar no registrador, seja a primeira a ser processada. Adaptado de: [Philips \(2000\)](#)

No modo de escuta o controlador recebe mensagens pela rede sem emitir o bit de ACK, enquanto que no modo de teste as mensagens enviadas pelo SJA1000, também são recebidas pelo controlador, permitindo que se teste máscaras e filtros programados ([PIRES, 2005](#); [PHILIPS, 2000](#)).

### 3.1.2 Transceptores de nível

Os transceptores de nível são responsáveis por converter os sinais CANTX e CANRX, no padrão TTL do controlador CAN em CAN\_H e CAN\_L (tensão diferencial) (Seção 2.3.1), para implementar a camada física do barramento.

Nessa seção serão exibidos dois transceptores de nível, o MCP 2551 ([MICROCHIP, 2010](#)), da Microchip e o TJA1041 ([PHILIPS, 2007](#)), da Philips.

#### Transceptor MCP 2551

O MCP 2551 é um transceptor compatível com a norma ISO 11898 (2.3.1), podendo trabalhar com velocidades de até 1 Mbit/s, possui proteção contra curto-circuito e imunidade ao ruído.

Os modos de operação suportados são: *high-speed*, *Slope-Control* e *Standby*. O modo *High-Speed* é selecionado conectando o pino Rs do transceptor ao pino comum (Vss), com essa conexão o *driver* de transmissão pode suportar as taxas de transmissão do CAN *High-speed*.

O modo *Slope-Control* permite maior controle dos tempos de subida (*slew-rate*) e

descida dos sinais em CAN\_*L* e CAN\_*H*. Esse controle é realizado por meio de um resistor externo entre o Rs e o pino comum. A Fig. 15 ilustra a influência do valor do resistor em  $\Omega$  [ohms] para o tempo de subida (*slew-rate* do Inglês). O uso de um potenciômetro no lugar do resistor fornece melhor ajuste dos tempos de acordo com a necessidade da aplicação. De acordo com o o valor mínimo do resistor é de 10 k $\Omega$ .

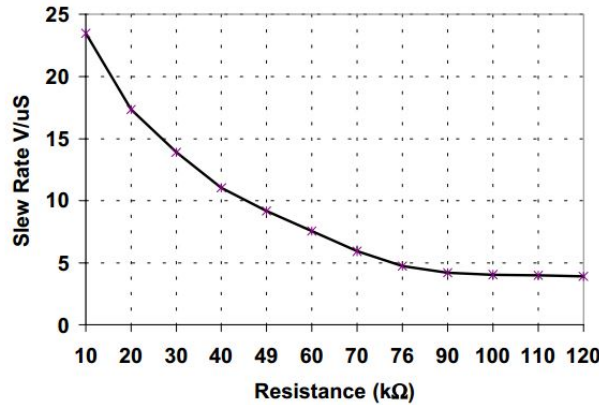


Figura 15 – Tempo de subida dos sinais CAN\_*L* e CAN\_*H* para diferentes valores de resistores. Retirado de: [Microchip \(2010\)](#).

### Transceptor TJA1041

O transceptor de nível TJA1041 é compatível ao padrão ISO 11898, podendo trabalhar com velocidades de transmissão de até 1 Mbit/s e identificador estendido ou padrão. Possui proteção contra curto-circuitos e interferência magnética, além de sistema de detecção de curto-circuito no barramento. O transceptor permite a implementação de até 110 nós na rede.

O transceptor pode operar em 5 diferentes modos, que são selecionados utilizando os pinos  $\overline{STB}$  e EN. A Fig. 16 fornece a tabela verdade com relação a esses pinos para seleção. Uma breve descrição sobre cada um dos 5 modos pode ser conferida abaixo.

- *Normal Mode*: Modo utilizado para a transmissão bi-direcional pelo barramento CAN. O transceptor converterá os sinais provindos do controlador CAN para o padrão diferencial do barramento.
- *Pwon/listen-only Mode*: O transmissor é desligado, operando somente com o receptor do transceptor ligado, assim pode-se receber mensagens.
- *Standby Mode*: O transceptor entra em modo de economia de energia, com baixo consumo de corrente.
- *Go-to-Sleep command Mode*: Fornece um caminho controlado para o transceptor entrar no *Sleep mode*. Esse modo se comporta como o *Standby Mode*.

Control pins		Internal flags			Operating mode	Pin INH
$\overline{STB}$	EN	UV <sub>NOM</sub>	UV <sub>BAT</sub>	pwon; wake-up		
X	X	set	X	X <sup>[2]</sup>	Sleep mode <sup>[3]</sup>	floating
		cleared	set	one or both set	Standby mode	H
				both cleared	no change from Sleep mode	floating
					Standby mode from any other mode	H
L	L	cleared	cleared	one or both set	Standby mode	H
				both cleared	no change from Sleep mode	floating
					Standby mode from any other mode	H
L	H	cleared	cleared	one or both set	Standby mode	H
				both cleared	no change from Sleep mode	floating
					go-to-sleep command mode from any other mode <sup>[4]</sup>	H <sup>[4]</sup>
H	L	cleared	cleared	X	pwon/listen-only mode	H
H	H	cleared	cleared	X	normal mode <sup>[5]</sup>	H

[1] X = don't care.

[2] Setting the pwon flag or the wake-up flag will clear the UV<sub>NOM</sub> flag.

[3] The transceiver directly enters Sleep mode and pin INH is set floating when the UV<sub>NOM</sub> flag is set (so after the undervoltage detection time on either V<sub>CC</sub> or V<sub>IO</sub> has elapsed before that voltage level has recovered).

[4] When go-to-sleep command mode is selected for longer than the minimum hold time of the go-to-sleep command, the transceiver will enter Sleep mode and pin INH is set floating.

[5] On entering normal mode the pwon flag and the wake-up flag will be cleared.

Figura 16 – Tabela verdade dos pinos  $\overline{STB}$  e EN para seleção dos modos de operação. Retirado de: Philips (2007).

- *Internal Flags*: Nesse modo o transceptor fica apto a fornecer diagnósticos sobre o sistema e detecção de falhas. Esse processo ocorre por meio de *flags*, que podem sinalizar uma tensão abaixo do recomendado para o transceptor ou falha no barramento, por exemplo.

## 3.2 Plataforma de desenvolvimento

Com o intuito de aplicar os conceitos das redes CAN, foi proposto o desenvolvimento de uma plataforma de desenvolvimento que fosse capaz de transmitir e receber mensagens pelo barramento via protocolo CAN. No desenvolvimento levou-se em consideração os seguintes aspectos:

- *Filtros*: Cada nó na rede deveria ter uma configuração diferente para seus filtros, recebendo apenas as mensagens destinadas a ele, com exceção do nó supervisor.
- *Supervisor*: Deveria ser desenvolvido uma interface supervisória capaz de monitorar o tráfego no barramento, além de ser capaz de transmitir mensagens pelo barramento.



### 3.2.1 Interligação dos módulos, *driver* de acionamento e as válvulas solenoides

A Fig. 17 exibe a conexão das unidades de controle, do *driver* de acionamento e das válvulas solenoides. O barramento CAN foi implementado por meio de cabos sem terminação, com impedância característica de  $120\ \Omega$ , conectores padrão DB-9 de comprimento 1 metro, fornecidos pela National Instruments. Para conexão dos módulos de controle, utilizou-se o *CAN Break Out Box*, também da empresa National Instruments.

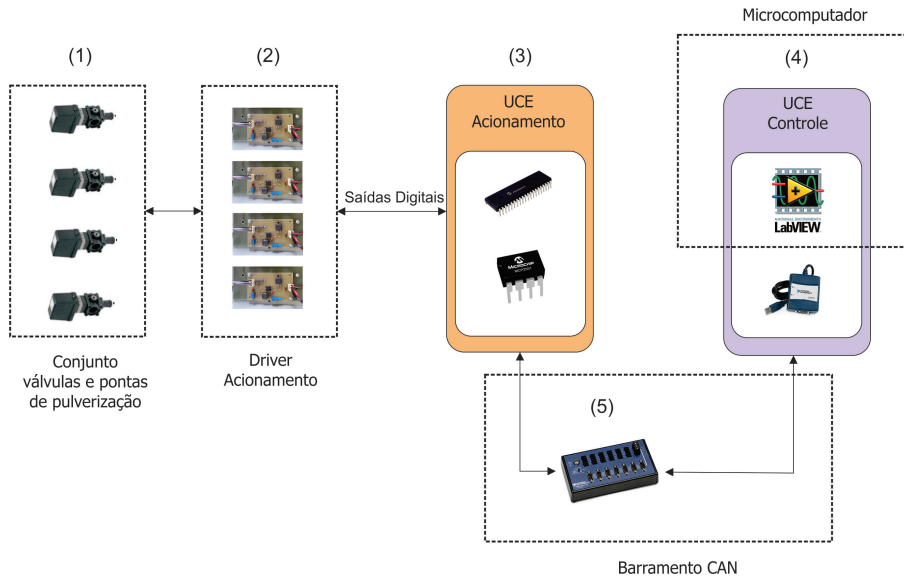


Figura 17 – Ilustração das conexões entre as válvulas solenoides, driver de acionamento e as UCes. Em (1) têm-se o conjunto de válvulas solenoides e bicos de pulverização. Em (2) é possível ver as 4 placas de utilizadas para acionar as válvulas solenoides. Em (3) está a UCE de Acionamento, onde tem-se um microcontrolador PIC18f46k80 com controlador CAN interno e um transceptor de nível MCP2551. O controle dessa unidade é realizado pela interface supervisória da UCE de controle (4). Essa unidade está abrigada em um microcomputador. As duas UCE estão conectadas utilizando-se o dispositivo *CAN break out box*, exibido em (5).

### 3.2.2 Arquitetura das unidades de controle eletrônicas

Chama-se unidade de controle eletrônica (UCE) a unidade controladora do nó. É composta por um microcontrolador, um controlador CAN e um transceptor de nível, como pode ser visto na Fig. 18. Para a UCE de acionamento escolheu-se o microcontrolador PIC18f46k80, que possui um controlador CAN interno (3.1.1) e o transceptor de nível utilizado foi o MCP 2551 (3.1.2). Para a UCE de controle foi utilizado o NI8473, que possui transceptor e controlador internos.

Para os testes de bancada foram utilizadas duas placas. A primeira é um *kit* de desenvolvimento de aplicações para microcontroladores PIC da MikroElektronika, a *Easy PIC v7* (MIKROELEKTRONIKA, 2015). A segunda placa foi desenvolvida em laboratório



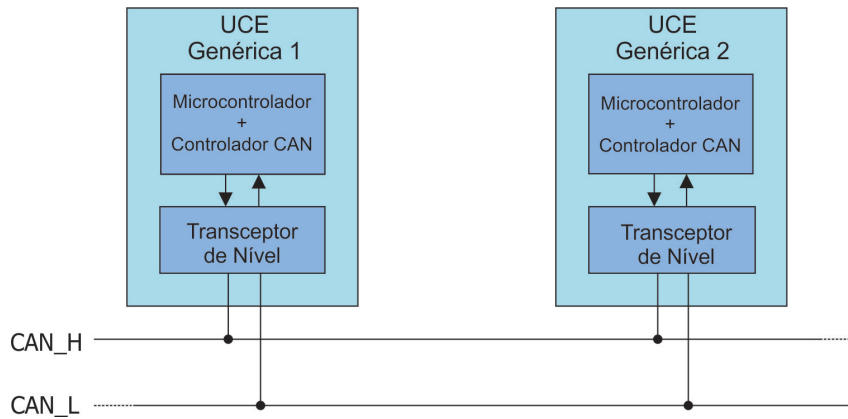


Figura 18 – Arquitetura de uma ECU genérica

e conta com o transceptor de nível MCP 2551. O esquemático da placa em questão pode ser conferido no Apêndice A.

### UCE de acionamento

Para o acionamento das 4 válvulas solenoides da bancada de pulverização (3.3) foi desenvolvida uma UCE cujo controle é realizado através da interface supervisória desenvolvida.

Para que seja realizado o acionamento das válvulas de pulverização, a UCE de acionamento deve receber uma mensagem pelo barramento CAN. Caso o identificador daquela seja apropriado para o filtro configurado no controlador CAN da UCE, esse envia um sinal digital ao driver que aciona as válvulas. O fluxograma exibido na Fig. 19 mostra como está estruturado o algoritmo de checagem das mensagens recebidas para acionamento das válvulas.

O driver é composto por quatro placas que podem atuar individualmente, permitindo que se acione as válvulas individualmente. O diagrama esquemático do circuito de acionamento está disponível no Apêndice A.

Os parâmetros utilizados no microcontrolador para o tempo de bit podem ser conferidos no Apêndice B.

### UCE de Controle e interface supervisória

Para controle e monitoramento dos nós do barramento, desenvolveu-se uma interface supervisória utilizando o software Labview, chamada de *Instrumento Virtual* (VI, das iniciais em Inglês). O VI foi baseado nos exemplos fornecidos pela National Instruments para comunicação via rede CAN (NI, 2015). O computador que abriga o VI está conectado ao barramento CAN por meio do dispositivo NI-8473, da National Instruments, que possui internamente um controlador CAN, SJA1000 (Seção 3.1.1) e um transceptor de nível,

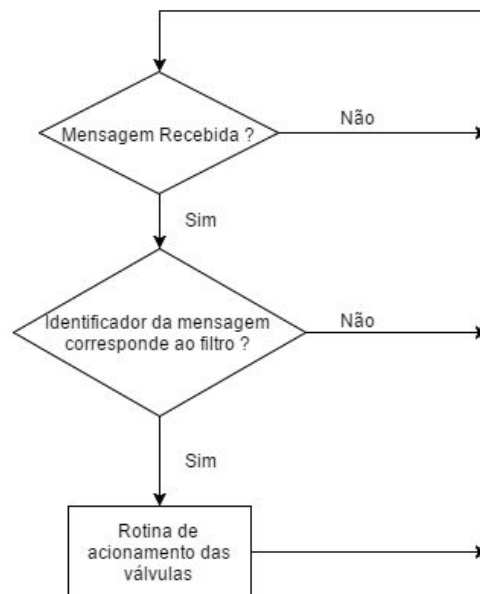


Figura 19 – Estrutura do algoritmo de verificação das mensagens recebidas para início da rotina de acionamento das válvulas de pulverização.

TJA1041 (Seção 3.1.2).

A interface desenvolvida para o controle do acionamento pode ser vista na Fig. 20. A comunicação com os nós do barramento é iniciada a partir da escolha da interface CAN a ser utilizada no menu *pop-up* no canto superior esquerdo. Para o envio das mensagens o usuário deve preencher o campo identificador com o valor desejado, inserir os valores para o campo *data* e clicar em *WRITE*. As mensagens recebidas são exibidas no canto superior direito, onde pode-se conferir o momento do recebimento, o identificador e o tamanho da mensagem em *bytes*.

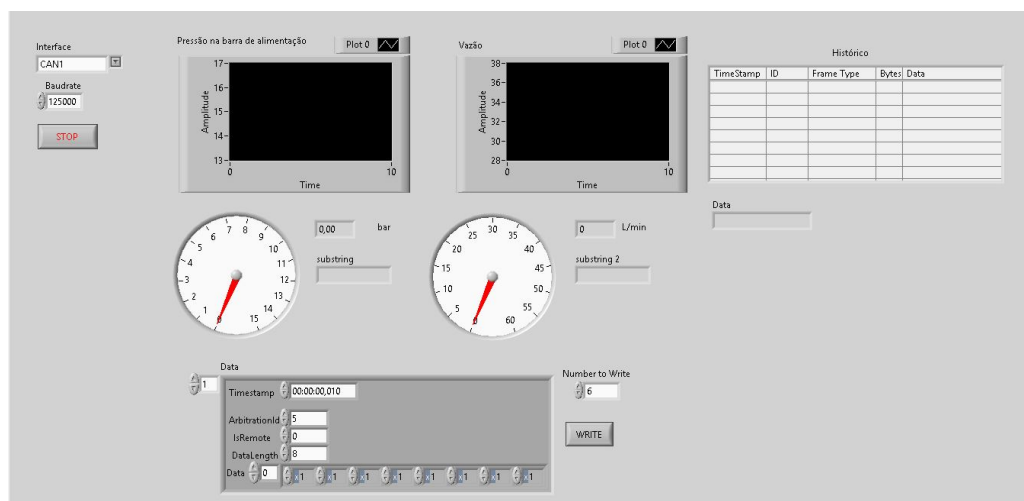


Figura 20 – Interface supervisória desenvolvida em ambiente Labview.

### 3.3 Sistema de desenvolvimento para ensaios e projetos de pulverizadores de agrotóxicos

Com o objetivo de atuar como uma plataforma flexível para o desenvolvimento de pulverizadores de agrotóxico, essa está instalada em um espaço compartilhado entre o Laboratório de Pulverização de Precisão, da Embrapa Instrumentação e o Laboratório de Controle, da Universidade de São Paulo (CRUVINEL et al., 2011; MERCALDI, 2012).

A automação sistema é realizada por meio de um controlador programável para automação (PAC), modelo CRIO-9073 (NI, 2010), da empresa National Instruments. O PAC possui um processador industrial de 266 Mhz e um chip de lógica reconfigurável *Field Programmable Gate Array* (FPGA). A Fig. 21 exibe a bancada e a Fig. 22 ilustra o sistema de pulverização de agrotóxicos à taxa variável utilizado para os testes desse trabalho.



Figura 21 – Vista frontal da bancada de pulverização utilizada no trabalho. Ao fundo está o painel de componentes elétricos, eletrônicos e hidráulicos. Mais a frente pode-se ver a seção de barra com os bicos e pontas de pulverização. (Imagem cedida pelo Laboratório de Pulverização de Precisão Embrapa / LAC).

O conjunto de válvulas e bicos de pulverização utilizados é composto por quatro válvulas da série QJS (TEEJET, 2015), da fabricante Teejet, com acionamento solenoide, e bicos REV3 (ARAG, 2015) da empresa ARAG. A Fig. 23 mostra a configuração dos bicos e válvulas.

Para os testes de validação do uso da rede CAN foi utilizada uma barra com 7 pontas convencionais de leque plano com 110 graus de abertura, modelo ISO 110-04. O conjunto QJS utilizou 4 pontas ISO 110-02.

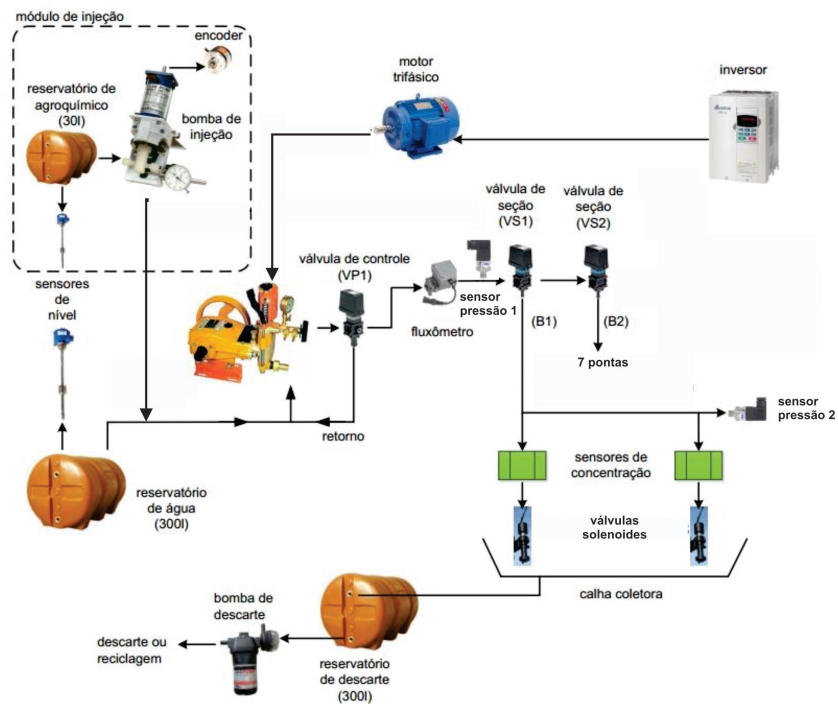


Figura 22 – Ilustração do sistema de pulverização utilizado para o projeto. O sistema permite aplicação a taxas variáveis com módulo de injeção direta central. Adaptado de: [Felizardo et al. \(2013\)](#).



Figura 23 – Conjunto de válvulas QJS e bicos de pulverização ISO 110-04 utilizados no trabalho (Imagem cedida pelo Laboratório de Pulverização de Precisão Embrapa / LAC).

## 4 Resultados

No presente capítulo são apresentados os resultados e análise dos testes realizados na rede CAN implementada com relação aos sinais das linhas do barramento, taxas e erros de transmissão. A versão do protocolo CAN utilizada foi a 2.0A (identificador padrão).

### 4.1 Sinais das linhas do barramento CAN

Para a análise dos sinais utilizou-se um osciloscópio da fabricante Tektronix, modelo TDS 2012B (TEKTRONIX, 2015). A UCE de controle foi configurada para enviar uma mensagem ao barramento. O circuito foi terminado com impedâncias de  $120\ \Omega$ . Os pinos com os sinais foram conectados aos terminais do osciloscópio. A Fig. 24 exibe os resultados. São destacados nas figuras as linhas de transmissão CAN\_H e CAN\_L e o sinal diferencial, em vermelho, com trechos dominantes e recessivos.

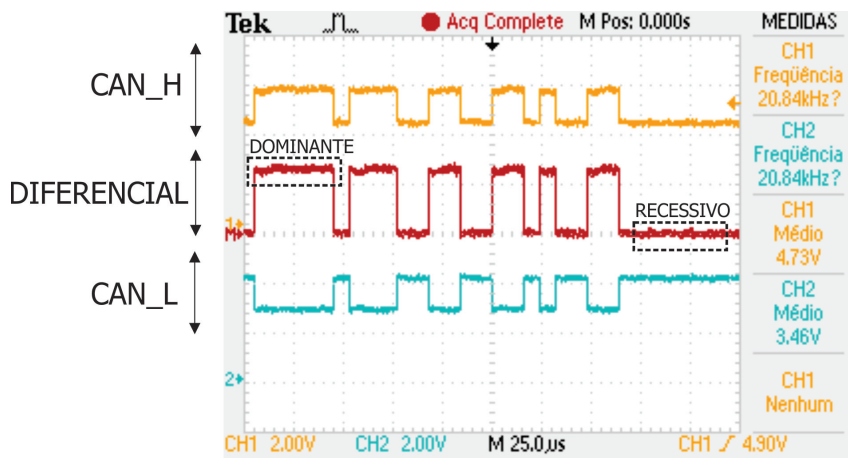


Figura 24 – Sinais registrados nas linhas de transmissão do barramento CAN quando uma mensagem é enviada pela UCE de controle.

### 4.2 Taxas de transmissão

Nessa seção são analisados resultados de testes para duas diferentes velocidades de transmissão e tamanho do campo de dados da mensagem enviada. Os testes foram realizados utilizando as UCEs de controle e acionamento, formando uma rede CAN com dois nós. Os dados eram enviados pela UCE de acionamento e recebidos pela de controle, onde eram analisados utilizando *NI-CAN Bus Monitor*, ferramenta disponível no DAQ Manager da National Instruments.

Os testes foram realizados da seguinte maneira: Para uma dada velocidade (125 ou 250 Kbit/s), foi definido o tamanho do campo de dados da mensagem enviada (1, 4 ou 8 bytes). Para cada caso (velocidade e campo de dados) definia-se o intervalo de tempo para qual a mensagem seria enviado ao barramento ( $t_{min}$ , 10, 100, 1000 ms). O menor tempo possível para o período de repetição das mensagens foi chamado  $t_{min}$ , que depende da microcontrolador, do controlador CAN e da velocidade de transmissão adotada na rede. Nessas condições obteve-se os resultados exibidos nas Figs. 25 e 26. Os gráficos são divididos em 4 regiões, cada uma dessas representa o intervalo de tempo entre a retransmissão da mensagem e os números na figura representam a quantidade de mensagens enviadas para o tempo programado no microcontrolador, por exemplo, para o tempo  $t_{min}$  a quantidade de mensagens enviadas é 2155.7 para mensagens de 1 byte.

e as curvas representam as taxas de transmissão das mensagens.

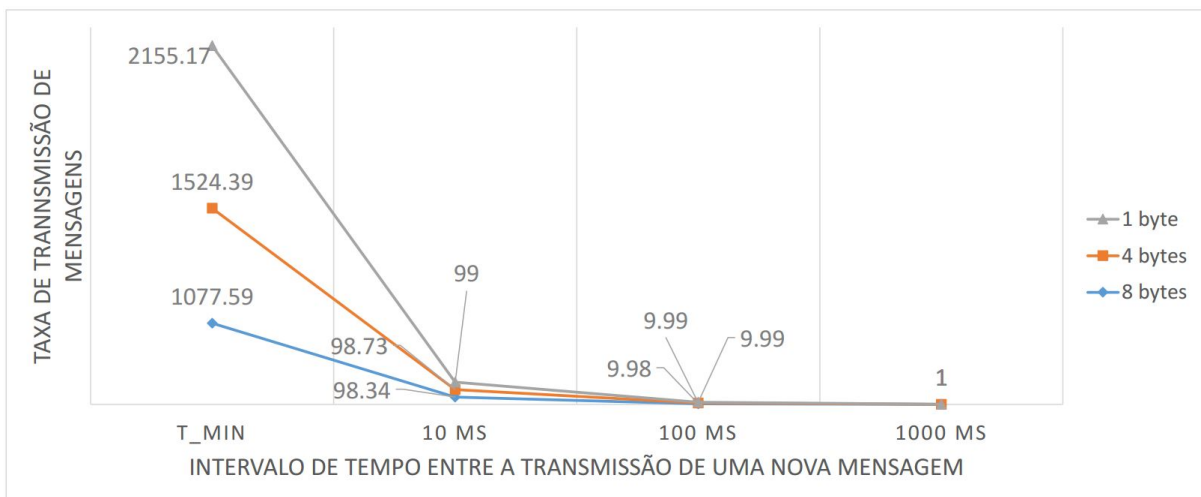


Figura 25 – Taxa de transmissão de mensagens para velocidade de 125 Kbit/s e três diferentes tamanhos do campo de dados da mensagem.

Pode-se observar que quanto maior o campo de dados da mensagem, menor a taxa de transmissão das mesmas quando se considera o  $t_{min}$  como período de repetição das mensagens. Para os outros períodos de transmissão as taxas são praticamente as mesmas. Essa diferença ocorre devido ao microcontrolador. Quando utiliza-se o período  $t_{min}$ , deve-se considerar o tempo necessário para que o vetor contendo a mensagem a ser enviado seja preparado para envio ao controlador CAN, esse tempo varia de acordo com o tamanho desse vetor. Dessa forma é natural que a mensagem com menor campo de dados seja a com maior taxa de transmissão. Para os outros intervalos de tempo esse efeito não ocorreu, já que o tempo para que o vetor contendo os dados seja processado é menor que os intervalos definidos. Outro fator é o tempo que o controlador CAN leva para montar o *frame* a ser enviado.

Quando se compara as taxas de transmissão de mensagens com relação à velocidade adotada, 125 ou 250 kbit/s, observa-se que dobrando uma, dobra-se a outra quando se

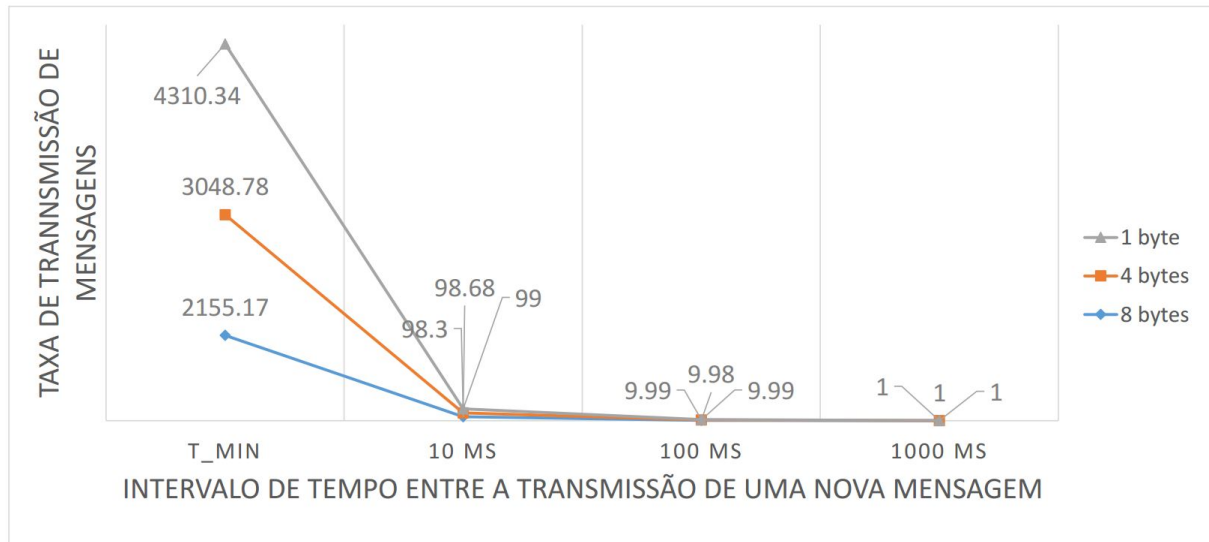


Figura 26 – Taxa de transmissão de mensagens para velocidade de 250 Kbit/s e três diferentes tamanhos do campo de dados da mensagem.

considera  $t_{min}$ . Para as outras taxas de transmissão o mesmo efeito não foi observado com a metodologia utilizada, permanecendo inalteradas. Esse efeito foi explicado no parágrafo anterior e pode ser visualizado nos dados das tabelas 3 e 4, onde são exibidos os tempos entre a transmissão de uma mensagem e outra obtidos experimentalmente.

Tabela 3 – Variação de tempo entre a transmissão das mensagens para uma velocidade de 125 kbit/s e 8 bytes de dados

Intervalo entre transmissões (ms)	Variação mínima (ms)	Variação max (ms)	$\Delta t$ (ms)
$t_{min}$	0,927	0,928	0,001000
10	10,169	10,178	0,009000
100	100,179	100,188	0,009000
1000	1000,283	1000,292	0,009000

Para as configurações adotadas, os tempos mínimos possíveis para a transmissão de uma mensagem com 8 bytes de dados são de 0.927 e 0.464 ms, para as velocidades de 125 e 250 kbit/s, respectivamente.

### 4.3 Carregamento do barramento em relação à quantidade de mensagens transmitidas

O carregamento do barramento pode ser definido como o tempo que o mesmo fica ocupado devido a transmissão de mensagens. Para sua análise utilizou-se o mesmo



Tabela 4 – Variação de tempo entre a transmissão das mensagens para uma velocidade de 250 kbit/s e 8 bytes de dados

Intervalo entre transmissões (ms)	Variação mínima (ms)	Variação max (ms)	$\Delta t$ (ms)
$t_{min}$	0,464	0,465	0,001000
10	10,169	10,174	0,005000
100	100,179	100,184	0,005000
1000	1000,284	1000,288	0,004000

procedimento adotado na seção anterior com relação às velocidades de transmissão e tamanho do campo de dados das mensagens enviadas. Os resultados são exibidos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Carregamento do barramento para uma velocidade de 125 kbit/s

(a) Intervalo programado de  $t_{min}$  entre as mensagens

Dados (bytes)	Carregamento (%)
8	100
4	100
1	100

(b) Intervalo programado de 10 ms entre as mensagens

Dados (bytes)	Carregamento (%)
8	10
4	7
1	5

Tabela 6 – Carregamento do barramento para uma velocidade de 250 kbit/s

(a) Intervalo programado  $t_{min}$  entre as mensagens

Dados (bytes)	Carregamento (%)
8	100
4	100
1	100

(b) Intervalo programado de 10 ms entre as mensagens

Dados (bytes)	Carregamento (%)
8	5
4	3
1	2

Analisando os dados tabelados pode-se notar que para o intervalo programado de  $t_{min}$  entre as transmissões das mensagens, o carregamento do barramento é de 100 % para ambas velocidades de transmissão, enquanto que para o intervalo programado de 10 ms entre as mensagens transmitidas, temos uma queda considerável no carregamento. Para outros intervalos testados (100 ms e 1000 ms) o carregamento registrado pelo software NI DAQ Manager foi zero, podendo ser considerado desprezível.



## 4.4 Acionamento das válvulas de pulverização agrícola

Utilizando as UCEs de controle e acionamento e o algoritmo descrito na Seção 3.2, acionou-se as válvulas de pulverização agrícola seguindo a sequência de passos exibida na Tabela 7. Para o teste foi utilizado o mesmo bico de pulverização nas 4 válvulas. Ao entrar em cada teste programado, o UCE de acionamento deveria enviar uma mensagem com identificador 0x35 pela rede CAN, a partir do teste 1 até o 8. Foi utilizado o controle PID de pressão, como explicado na Seção 1.3 do Capítulo 1, e duas diferentes referências, 1 e 2 bar. Para salvar as informações e realizar o controle da bancada de pulverização foi utilizado o CRIO-9073 (3.3) (MERCALDI et al., 2011). O período entre cada amostra foi de 50 ms. Os resultados são exibidos nas Figs. 28, 29, 30a e 30b. Cada transição de nível no gráfico corresponde a um teste. Os valores de vazão para cada um está representado no gráfico.

Tabela 7 – Sequência de testes realizados para o acionamento das válvulas de pulverização. A ilustração de cada teste pode ser conferida na Fig. 27.

Teste	Válvulas Ativas	Tempo (s)
1	Nenhuma	10
2	V1	10
3	V1 e V2	10
4	V1, V2 e V3	10
5	V1, V2, V3 e V4	10
6	V2, V3 e V4	10
7	V3 e V4	10
8	V4	10
9	Nenhuma	10

O valor da vazão medida pode ser visto nas curvas em azul das Figs. 28 e 29. Mesma com a oscilação na vazão devido a abertura e fechamento das válvulas, a pressão se manteve no patamar das referência adotadas (1 e 2 bar). Na Fig. 30 é mostrado o relatório das mensagens recebidas pelo UCE de controle durante o teste de acionamento. Nota-se que todas as mensagens foram recebidas em intervalos de 10 segundos (intervalos programados no teste) sem erros.

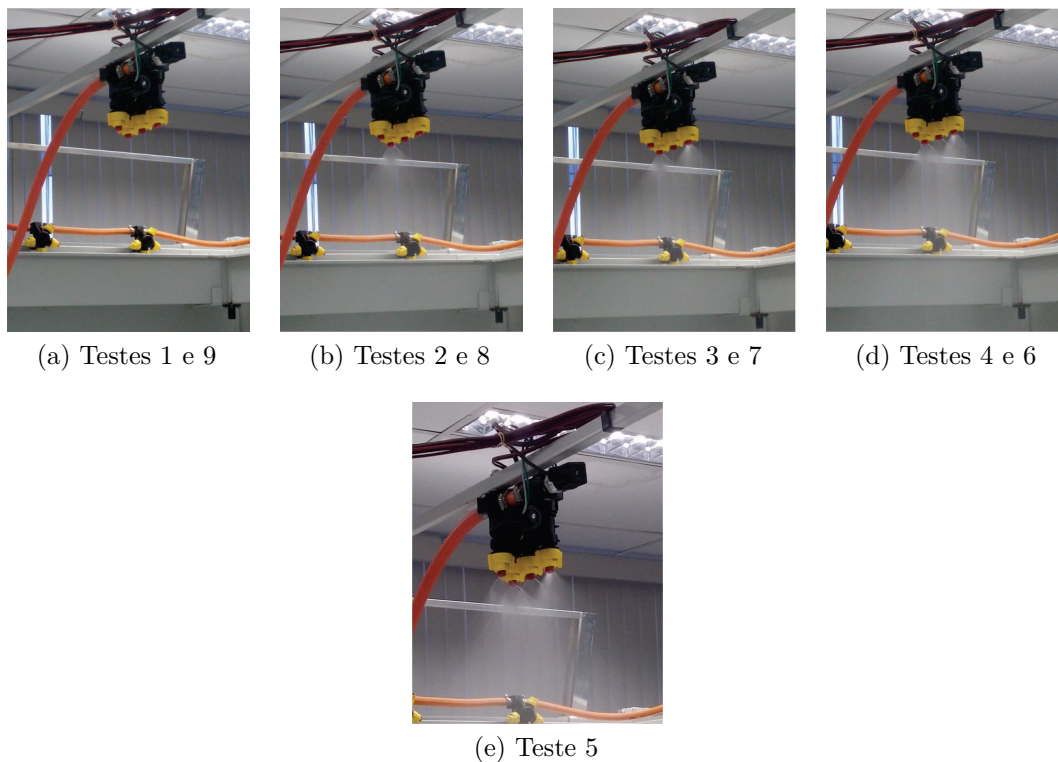


Figura 27 – Ilustração de cada teste.

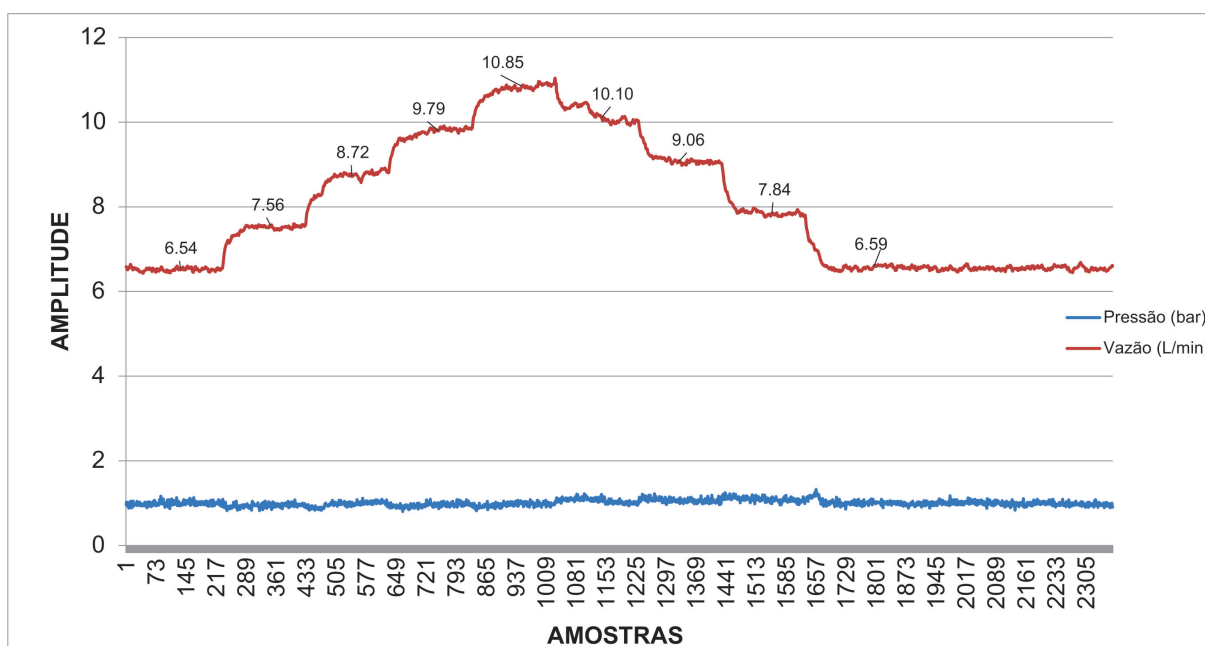


Figura 28 – Teste de acionamento das válvulas de pulverização utilizando controle por pressão e referência igual a 1 bar.

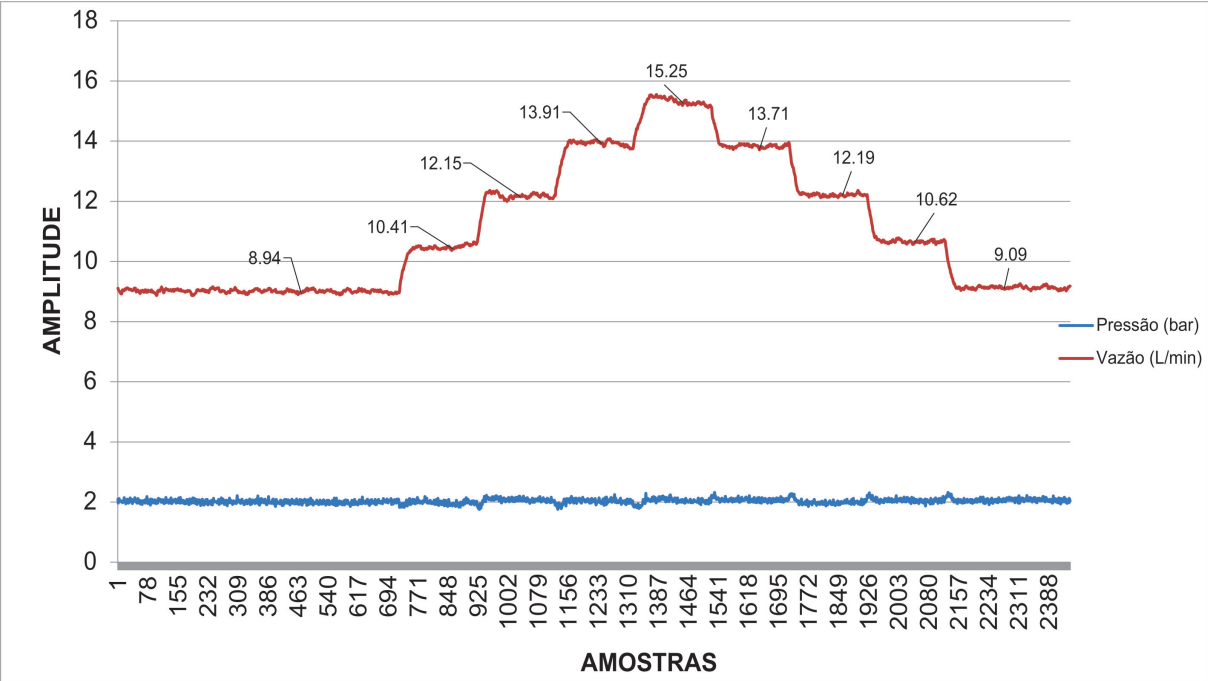


Figura 29 – Teste de acionamento das válvulas de pulverização utilizando controle por pressão e referência igual a 2 bar.

TimeStamp	ID	Frame Type	Bytes	Data
07:13:53.959	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:13:43.958	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:13:33.957	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:13:23.955	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:13:13.954	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:13:03.953	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:12:53.951	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:12:43.950	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00

(a) Teste com referência de 1 bar.

TimeStamp	ID	Frame Type	Bytes	Data
07:22:50.643	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:22:40.641	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:22:30.640	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:22:20.639	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:22:10.637	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:22:00.636	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:21:50.635	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00
07:21:40.633	00000035	CAN Data Fram	8	00 00 00 00 00 00 00 00

(b) Teste com referência de 2 bar.

Figura 30 – Mensagem recebida pela ECU de controle ao início de cada rotina de teste.



## 5 Considerações finais

### 5.1 Conclusão

Existe uma tendência no aumento do uso das redes de comunicação CAN no maquinário agrícola, que é justificada pela facilidade de implementação e padronização, resistência a ruídos e quantidade de reduzida de fiação. Com os avanços relacionados à ISO-11873 espera-se que sua adoção seja ainda maior, já que existe interesse tanto dos fabricantes de máquinas agrícolas, quanto de pesquisadores e produtores na padronização da comunicação entre os dispositivos instalados nessas máquinas. A robustez da rede é outro fator atrativo. Nos testes realizados não ocorreram erros relacionados à comunicação, o que indica a robustez da rede implementada.

A facilidade de implementação da rede foi notada nesse trabalho. Caso a comunicação entre os dispositivos fosse realizado por outros padrões conhecidos, como RS-232 (padrão serial), a quantidade de fios e sincronia da rede seriam fatores agravantes. A rede CAN permite ao desenvolvedor maior enfoque nas aplicações dos nós ligados à rede, pois a dinâmica do barramento (montagem dos *frames*, detecção de erros, níveis de tensão, entre outros) é realizada de forma automática pelos controladores CAN e os transceptores de nível, bastando uma configuração inicial, sem necessidade de se desenvolver rotinas extras. Em vista desses elementos valida-se o uso dessa modalidade de redes de comunicação para o acionamento e controle de pontas de pulverização.

### 5.2 Trabalhos futuros

Com o conhecimento adquirido no desenvolvimento desse trabalho pretende-se desenvolver outras UCEs para sensores e atuadores presentes na bancada de testes e desenvolvimento de pulverizadores agrícolas, permitindo o uso de um barramento único para o tráfego de informação entre os módulos. Outra possibilidade é a implementação do padrão ISO 11873 à rede desenvolvida, acompanhando a tendência de padronização da comunicação dos dispositivos utilizados nas máquinas agrícolas.



## Referências

- ANTUNIASI, U. R. *Tese de livre docência - Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, SP, 1999. Citado na página 21.
- ARAG. *Catálogo online da Arag*. 2015. Acesso em: 15 de nov 2015. Disponível em: <<http://www.aragnet.com>>. Citado na página 53.
- BAIO, F.; ANTUNIASI, U. A procura do alvo. *Cultivar Máquinas*, v. 34, n. 3, p. 8–12, 2004. Citado na página 24.
- BODE, L. E.; BRETTHAUER, S. M. Agricultural chemical application technology: a remarkable past and an amazing future. *Transactions of the ASABE*, American Society of Agricultural Engineers, v. 51, n. 2, p. 391–395, 2008. Citado na página 24.
- BOLLER, W.; RAETANO, C. Bicos e pontas de pulverização de energia hidráulica, regulagens e calibração de pulverizadores de barra. *Tecnologia de aplicação para culturas anuais. Passo Fundo: Aldeia Norte*, 2011. Citado na página 26.
- BOLLER, W.; RATEANO, C. G. Bicos e pontas de pulverização de energia hidráulica, regulagens e calibração de pulverizadores de barras. In: \_\_\_\_\_. *Tecnologia de aplicação para culturas anuais*. FEPAF, 2011. p. 51–82. Citado na página 22.
- BOSCH, R. Can specification version 2.0. *Rober Bousch GmbH, Postfach*, v. 300240, 1991. Citado 5 vezes nas páginas 21, 35, 39, 40 e 45.
- CHO, H.-K.; MARLEY, S. J.; BAKER, J. L. Injection metering of spray concentrates. *Paper No. MCR*, p. 85–138, 1985. Citado na página 24.
- CRUVINEL, P. E. et al. Bancada automatizada para ensaios e desenvolvimento de pulverizadores de agrotóxicos, aplicadores de fertilizantes líquidos e maturadores em culturas agrícolas sob manejo baseado em agricultura de precisão. In: *Agricultura de Precisão: um Novo Olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 96–100. Citado na página 53.
- DICKE, D.; KÜHBAUCH, W. Temporal dynamics of weed populations in arable fields using long-term site-specific weed control. In: *Proceedings of 15th Australian Weeds Conference: Managing Weeds in a Changing Climate*, 2006. p. 375–378. Citado na página 24.
- DIEGUES, D. Rede CAN para estimativa de orientação e posição de máquinas agrícolas. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 36, 38, 40 e 41.
- FELIZARDO, K. R. *Modelagem e controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta*. Tese (Doutorado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Citado na página 27.

- FELIZARDO, K. R. et al. Modeling and predictive control of a variable-rate spraying system. In: IEEE. *Modelling and Simulation (EUROSIM), 2013 8th EUROSIM Congress on*, 2013. p. 202–207. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 54.
- FRITZ KÜBLER GMBH. *Technical Manual: Absolute singleturn encoder with sae j1939*. Germany, 2009. 23 p. Citado na página 36.
- FROST, A. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Elsevier, v. 46, p. 55–70, 1990. Citado na página 26.
- GEBHARDT, M.; KLIETHERMES, A.; GOERING, C. Metering concentrated pesticides [design, drag-body type, flowmeters]. *Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers]*, 1984. Citado na página 24.
- GERHARDS, R.; OEBEL, H. Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and gps-controlled patch spraying. *Weed Research*, Wiley Online Library, v. 46, n. 3, p. 185–193, 2006. Citado na página 24.
- GUIMARÃES, A. d. A. *Análise da norma ISO11783 e sua utilização na implementação do barramento do implemento de um monitor de semeadora*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003. Citado na página 40.
- IBRAHIM, D. *PIC Microcontroller Projects in C: Basic to Advanced*, Newnes, 2014. Citado na página 34.
- INAMASU, R. Y. Padronização da eletrônica embarcada em máquinas agrícolas. In: . Boletim técnico agricultura de precisão Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Brasília, Biblioteca nacional de agricultura (BINAGRI), 2013. Citado na página 43.
- JACTO. *Catálogo online da Jacto*. 2015. Acesso em: 15 nov 2015. Disponível em: <<http://www.jacto.com.br>>. Citado na página 23.
- KOO, Y.; YOUNG, S.; KUHLMAN, D. Flow characteristics of injected concentrates in spray booms. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery (Korea Republic)*, 1996. Citado na página 24.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. Redes de computadores e a internet. *São Paulo: Person*, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- LAMMERS, P. S.; VONDRICKA, J. Direct injectiondirect injection sprayer. In: *Precision Crop Protection-the Challenge and Use of Heterogeneity*, Springer, 2010. p. 295–310. Citado na página 25.
- LARSON, G.; KUHLMAN, D.; TENEYCK, G. Direct metering of pesticide concentration. *Transactions of the ASAE (USA)*, 1982. Citado na página 24.
- MERCALDI, H. V. *Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta*. Dissertação (Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 11, 25, 26, 27 e 53.



MERCALDI, H. V. et al. Modelagem de um sistema de injeção direta de herbicida em taxa variável para aplicação em culturas agrícolas. In: *Agricultura de Precisão: um Novo Olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 101–105. Citado na página 59.

MICROCHIP. *Data Sheet: Mcp 2551 high-speed CAN transceiver*, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 11, 47 e 48.

MICROCHIP. *Data Sheet: Pic18f46k80 ecan module*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

MIKROELEKTRONIKA. *Catálogo online da MikroElektronika*. 2015. Acesso em: 15 de nov 2015. Disponível em: <<http://www.mikroe.com>>. Citado na página 50.

MUNACK, A.; BUNING, E.; SPECKMANN, H. A high-performance control system for spreading liquid manure. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 387–391, 2001. Citado na página 27.

NATALE, M. D. Understanding and using the controller area network. *inst. eecs. berkeley.edu/~ee249/fa08/Lectures/handout\_canbus2.pdf*, Citeseer, 2008. Citado 10 vezes nas páginas 11, 15, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40 e 42.

NI. *NI-CAN Hardware and Software Manual*. Austin, Texas, 2006. Citado na página 45.

NI. *cRIO 9072/3/4 - Operation instruction and specification*. Austin, Texas, 2010. Citado na página 53.

NI. *Dimensional Drawing for CAN Breakout Box*. Austin, Texas, 2014. Citado na página 45.

NI. *Exemplos online*. 2015. Acesso em: 15 de nov 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/examples/pt>>. Citado na página 51.

NISSEN, H. Status of standardization and implementation. *Workshop ISOBus Brasil*, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 21.

OERKE, E.-C. et al. *Precision Crop Protection-The challenge and use of heterogeneity*, Springer, 2010. v. 5. Citado na página 25.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4. ed. São Paulo, Brasi: Prentice Hall Brasil, 2003. Citado na página 26.

PECK, D.; ROTH, L. Field sprayer introduction system development and evaluation. *Transactions of the ASAE (USA)*, p. 107–116, 1975. Citado na página 24.

PEREIRA, R. R. D. *Protocolo ISO 11783: procedimentos para comunicação serial de dados do controlador de tarefa*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 46.

PFEIFFER, O.; AYRE, A.; KEYDEL, C. *Embedded networking with CAN and CANopen*, Copperhill Media, 2008. Citado na página 37.

PHILIPS. *Data Sheet: Pca82c200*, 1990. Citado na página 46.

PHILIPS. *Data Sheet: Sja1000*, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 11, 45, 46 e 47.

- PHILIPS. *Data Sheet: Tja1041 high speed can transceiver*, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 11, 47 e 49.
- PIRES, A. J. M. *Comunicação de tempo-real em barramentos CAN baseados no controlador SJA1000*. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.
- PONTELLI, C. O. *Estratégias de controle para isolamento ativa de vibrações em barras de pulverizadores agrícolas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado na página 22.
- PULVERIZADORES, A. *Catálogo online da Adventure Pulverizadores*. 2015. Acesso em: 15 de nov 2015. Disponível em: <<http://www.adventurepulv.com.br>>. Citado na página 23.
- REICHARD, D.; LADD, T. Pesticide injection and transfer system for field sprayers. *Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers](USA)*, 1983. Citado na página 24.
- ROCKWELL, A.; AYERS, P. A variable rate, direct nozzle injection field sprayer. *Applied engineering in agriculture (USA)*, 1996. Citado na página 25.
- SOUSA, R. V. *CAN (Controller Area Network): uma abordagem para automação e controle na área agrícola*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2002. Citado 8 vezes nas páginas 11, 15, 29, 32, 36, 38, 39 e 40.
- SUDDUTH, K.; BORGELT, S.; HOU, J. Performance of a chemical injection sprayer system. *Applied engineering in agriculture (USA)*, 1995. Citado na página 25.
- TEEJET. *Catálogo online da Teejet*. 2015. Acesso em: 15 de nov 2015. Disponível em: <<http://www.teejet.com>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 23 e 53.
- TEKTRONIX. *Catálogo online da Tektronix do Brasil*. 2015. Acesso em: 15 de nov 2015. Disponível em: <<http://www.tektronixbrasil.com.br>>. Citado na página 55.
- TIMMERMAN, C.; GERHARDS, R.; KÜHBAUCH, W. The economic impact of site-specific weed control. *Precision Agriculture*, Springer, v. 4, n. 3, p. 249–260, 2003. Citado na página 24.
- ULSON, J. A. *Desenvolvimento de um sistema de controle inteligente a aplicação de fertilizantes líquidos em taxas variáveis*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2002. Citado na página 27.
- VIDRINE, C. G. et al. A constant pesticide application rate sprayer model [equipment]. *Transactions of the ASAE (USA)*, 1975. Citado na página 24.
- VONDRICKA, J.; HLOBEN, P.; LAMMERS, P. S. Optimization of direct nozzle injection system for site-specific herbicide application. In: ASABE MEETING PRESENTATION. Minneapolis, Minnesota, 2007. p. Paper No. 071085. Citado na página 25.
- VONDRICKA, J.; LAMMERS, P. S. Evaluation of a carrier control valve for a direct nozzle injection system. *Biosystems engineering*, Elsevier, v. 103, n. 1, p. 43–48, 2009. Citado na página 24.

WALKER, J. T.; BANSAL, R. Development and characterization of variable orifice nozzles for spraying agro-chemicals. In: *1999 ASAE Annual International Meeting*, 1999. Citado na página 25.

WAY, T. et al. Simulation of chemical application accuracy for injection sprayers. *Transactions of the ASAE (USA)*, 1992. Citado na página 26.

ZHU, H. et al. Mixture uniformity in supply lines and spray patterns of a laboratory injection sprayer. *Applied engineering in agriculture (USA)*, 1998. Citado na página 25.



## Apêndices



# APÊNDICE A – Esquemático das placas utilizadas

## A.1 Diagrama elétrico da placa do transceptor de nível

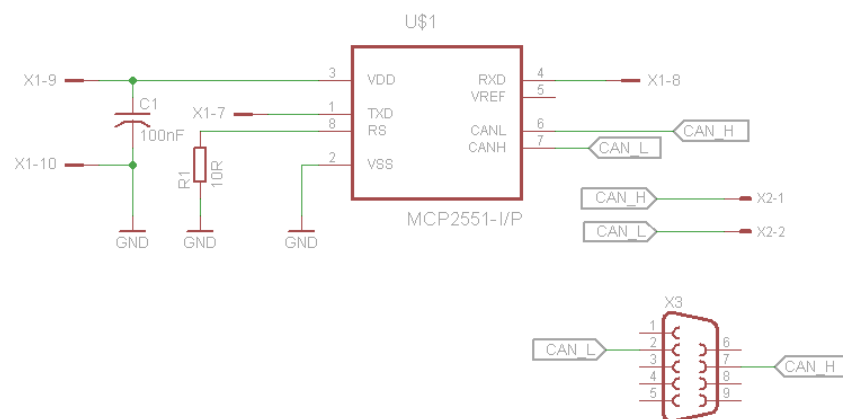


Figura 31 – Diagrama esquemático da placa do transceptor de nível.

## A.2 Diagrama elétrico da placa de acionamento

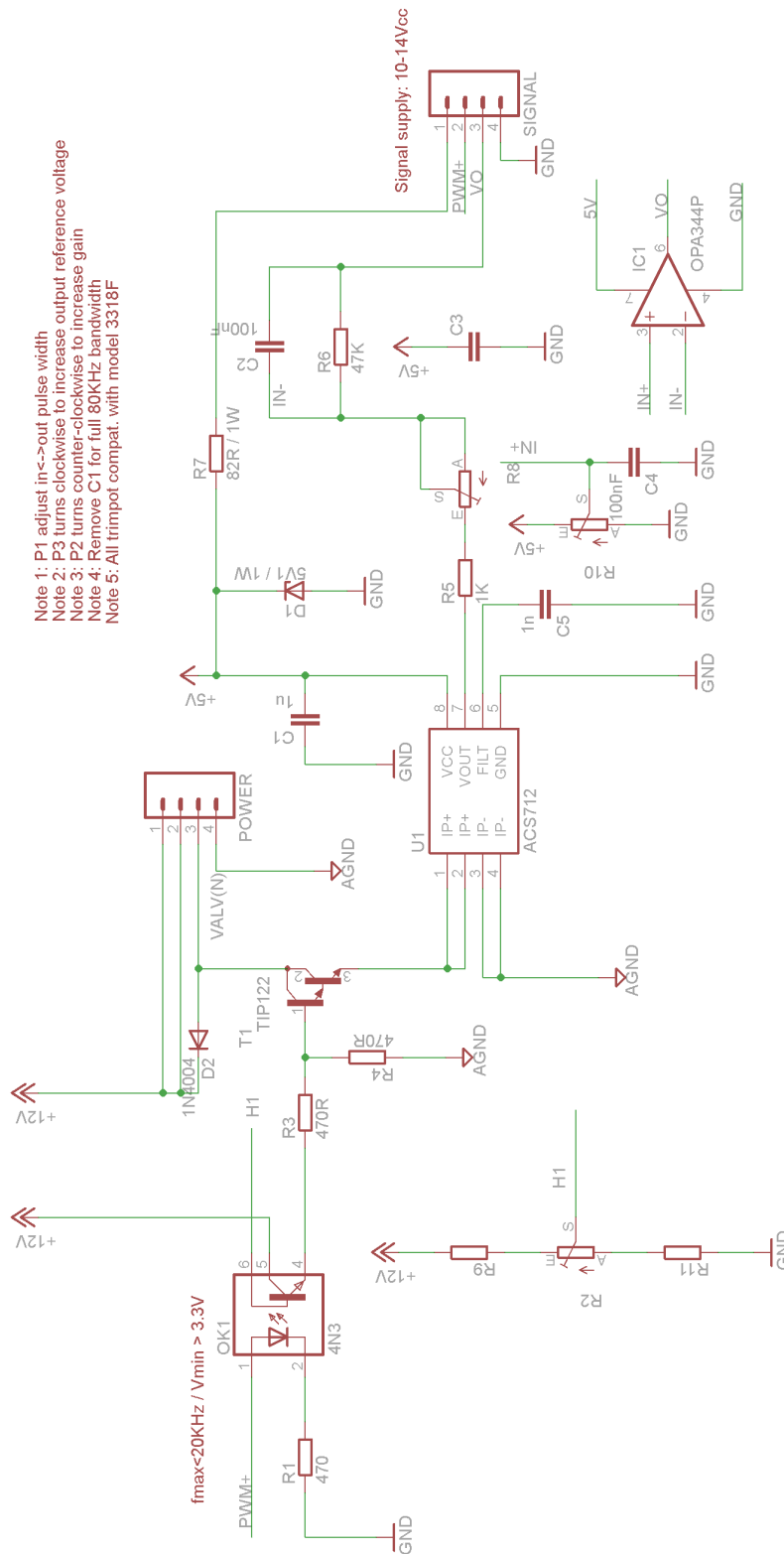


Figura 32 – Diagrama esquemático do circuito do driver de acionamento das válvulas solenoides.



## APÊNDICE B – Código em linguagem C da ECU de acionamento

```

#define MASTER

#define VALV1_ON  PORTC.F2 = 0xFF
#define VALV1_OFF PORTC.F2 = 0x00
#define VALV2_ON  PORTC.F3 = 0xFF
#define VALV2_OFF PORTC.F3 = 0x00
#define VALV3_ON  PORTC.F4 = 0xFF
#define VALV3_OFF PORTC.F4 = 0x00
#define VALV4_ON  PORTC.F5 = 0xFF
#define VALV4_OFF PORTC.F5 = 0x00

unsigned char initFlags, sendFlags, rcvFlags;

unsigned char dataLen1 = 1;
unsigned char dataLen2 = 2;
unsigned char dataLen3 = 3;
unsigned char dataLen4 = 4;
unsigned char dataLen5 = 5;
unsigned char dataLen6 = 6;
unsigned char dataLen7 = 7;
unsigned char dataLen8 = 8;
unsigned char __dataLen = 8;
unsigned char sensorLen = 1;

char msgRcvd;
const long idM = 0x34;
const long idE = 0x35;

int i = 1;

char idRx;
char _data[8];
char __data[8];

```

```
char dadosensor[1];

/*const unsigned int SJW = 4;
const unsigned int BRP = 2;           // 125 kbps
const unsigned int PHSEG1 = 4;
const unsigned int PHSEG2 = 4;
const unsigned int PROPSEG = 7;*/

const unsigned int SJW = 1;
const unsigned int BRP = 2;           //250 kbps
const unsigned int PHSEG1 = 1;
const unsigned int PHSEG2 = 2;
const unsigned int PROPSEG = 4;

const unsigned int CAN_CONFIG_FLAGS =
_CAN_CONFIG_SAMPLE_ONCE &
_CAN_CONFIG_PHSEG2_PRG_ON &
// _CAN_CONFIG_XTD_MSG      &
_CAN_CONFIG_STD_MSG        &
_CAN_CONFIG_DBL_BUFFER_ON &
_CAN_CONFIG_VALID_STD_MSG &
_CAN_CONFIG_LINE_FILTER_OFF;           //250000

void configPIC(){

ADCON0.ANSELO = 0X00;
ADCON1 = 0XFF;
ADCON1 = 0b00001111;
ADCON0.ANSEL1 = 0X00;
ADCON0.ANSEL2 = 0X00;
ADCON0.ANSEL3 = 0X00;
ADCON0.ANSEL4 = 0X00;
ADCON0.ANSEL5 = 0X00;
ADCON0.ANSEL6 = 0X00;
ADCON0.ANSEL7 = 0X00;
```

---

```
TRISA = 0X00;
PORTA = 0X00;
TRISB = 0x08;
TRISD = 0X00;      // LEDS
TRISC = 0X00;
PORTC = 0X00;

}

void configCAN(){

    initFlags = 0;
    sendFlags = 0;
    rcvFlags = 0;

    sendFlags = _CAN_TX_PRIORITY_0 &
    _CAN_TX_STD_FRAME &
    _CAN_TX_NO_RTR_FRAME;

    CANInitialize(SJW, BRP, PHSEG1, PHSEG2, PROPSEG, CAN_CONFIG_FLAGS);

    CANSetOperationMode(_CAN_MODE_CONFIG,0xFF);

    CANSetMask(_CAN_MASK_B1, -1, _CAN_CONFIG_STD_MSG);
    CANSetMask(_CAN_MASK_B2, -1, _CAN_CONFIG_STD_MSG);

    //can filter

    CANSetFilter(_CAN_FILTER_B2_F3,IdM,_CAN_CONFIG_STD_MSG);
    CANSetFilter(_CAN_FILTER_B1_F1,IdE,_CAN_CONFIG_STD_MSG);

    CANSetOperationMode(_CAN_MODE_NORMAL,0xFF);
}
```

```
void liga0(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_OFF;
VALV2_OFF;
VALV3_OFF;
VALV4_OFF;
```

```
}
void liga1(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_ON;
VALV2_OFF;
VALV3_OFF;
VALV4_OFF;
}
```

```
void liga2(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_ON;
VALV2_ON;
VALV3_OFF;
VALV4_OFF;
}
```

```
void liga3(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_ON;
VALV2_ON;
VALV3_ON;
VALV4_OFF;
}
```

```
void liga4(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_ON;
VALV2_ON;
```

---

```
VALV3_ON;
VALV4_ON;
}

void liga5(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_OFF;
VALV2_ON;
VALV3_ON;
VALV4_ON;
}

void liga6(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_OFF;
VALV2_OFF;
VALV3_ON;
VALV4_ON;
}

void liga7(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_OFF;
VALV2_OFF;
VALV3_OFF;
VALV4_ON;
}

void liga8(){
CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);
VALV1_OFF;
VALV2_OFF;
VALV3_OFF;
VALV4_OFF;
}

void desliga(){
VALV1_OFF;
VALV2_OFF;
VALV3_OFF;
```

```
VALV4_OFF;
}

void sequencia(){

    liga0();
    delay_ms(10000) ;
    liga1();
    delay_ms(10000) ;
    liga2();
    delay_ms(10000) ;
    liga3();
    delay_ms(10000) ;
    liga4();
    delay_ms(10000) ;
    liga5();
    delay_ms(10000) ;
    liga6();
    delay_ms(10000) ;
    liga7();
    delay_ms(10000) ;
    liga8();
    delay_ms(10000) ;

    desliga();

}

void main()

{

    configPIC();
    configCAN();

    PORTC.F2 = 0;
    PORTC.F3 = 0;
    PORTC.F4 = 0;
    PORTC.F5 = 0;

    i = 0;
```

```
VALV1_OFF;  
VALV2_OFF;  
VALV3_OFF;  
VALV4_OFF;
```

```
_data[0] = 0x00;  
_data[1] = 0x00;  
_data[2] = 0x00;  
_data[3] = 0x00;  
_data[4] = 0x00;  
_data[5] = 0x00;  
_data[6] = 0x00;  
_data[7] = 0x00;
```

```
while(1){  
  
    CANWrite(idE,_data,__dataLen,sendFlags);  
    delay_ms(200);  
  
    void sequencia();  
  
}  
}
```





## APÊNDICE C – Diagrama de blocos do VI da ECU de controle

- C.1 Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de envio de mensagens.

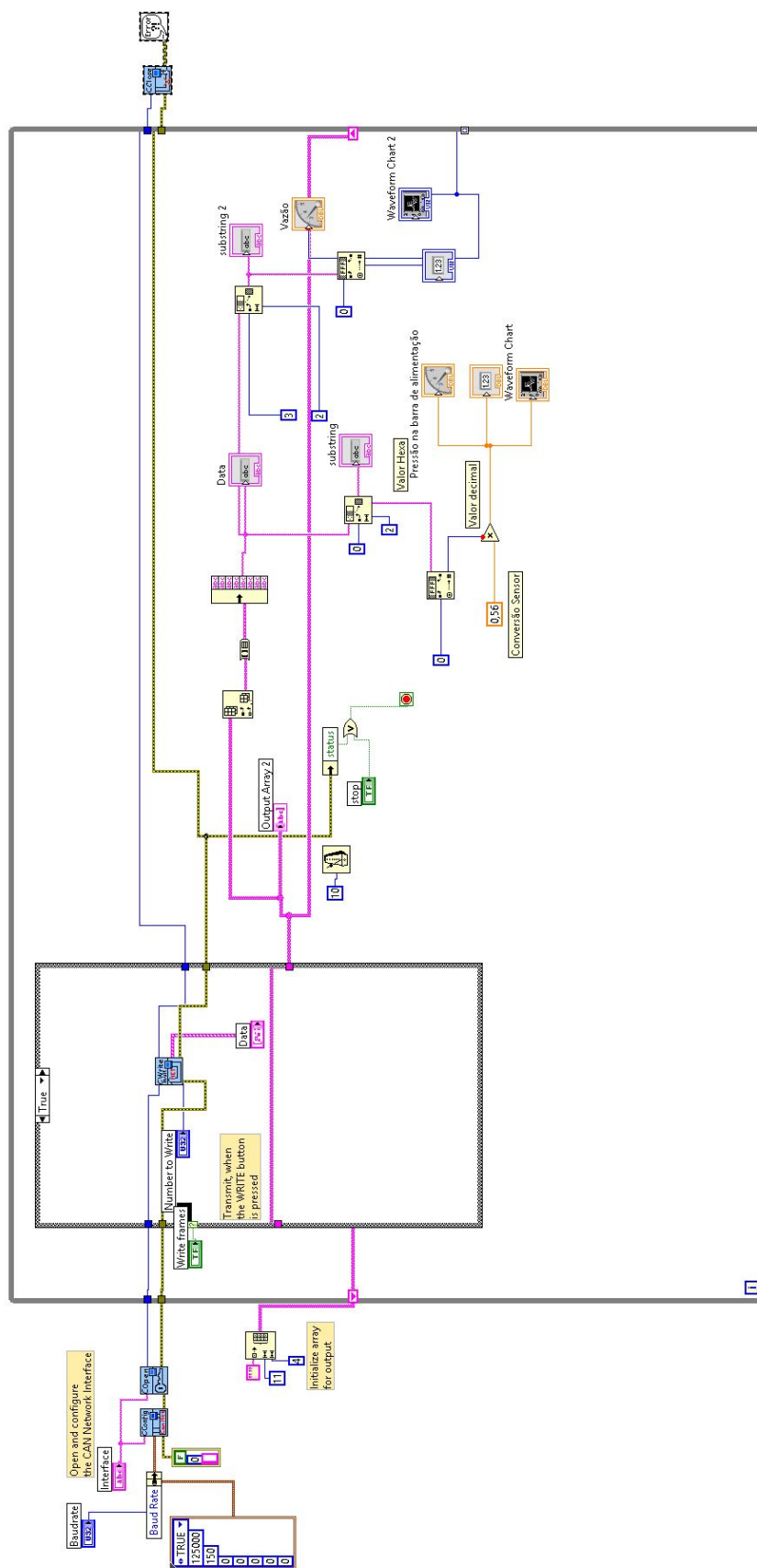


Figura 33 – Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de envio de mensagens

## C.2 Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de recepção de mensagens.

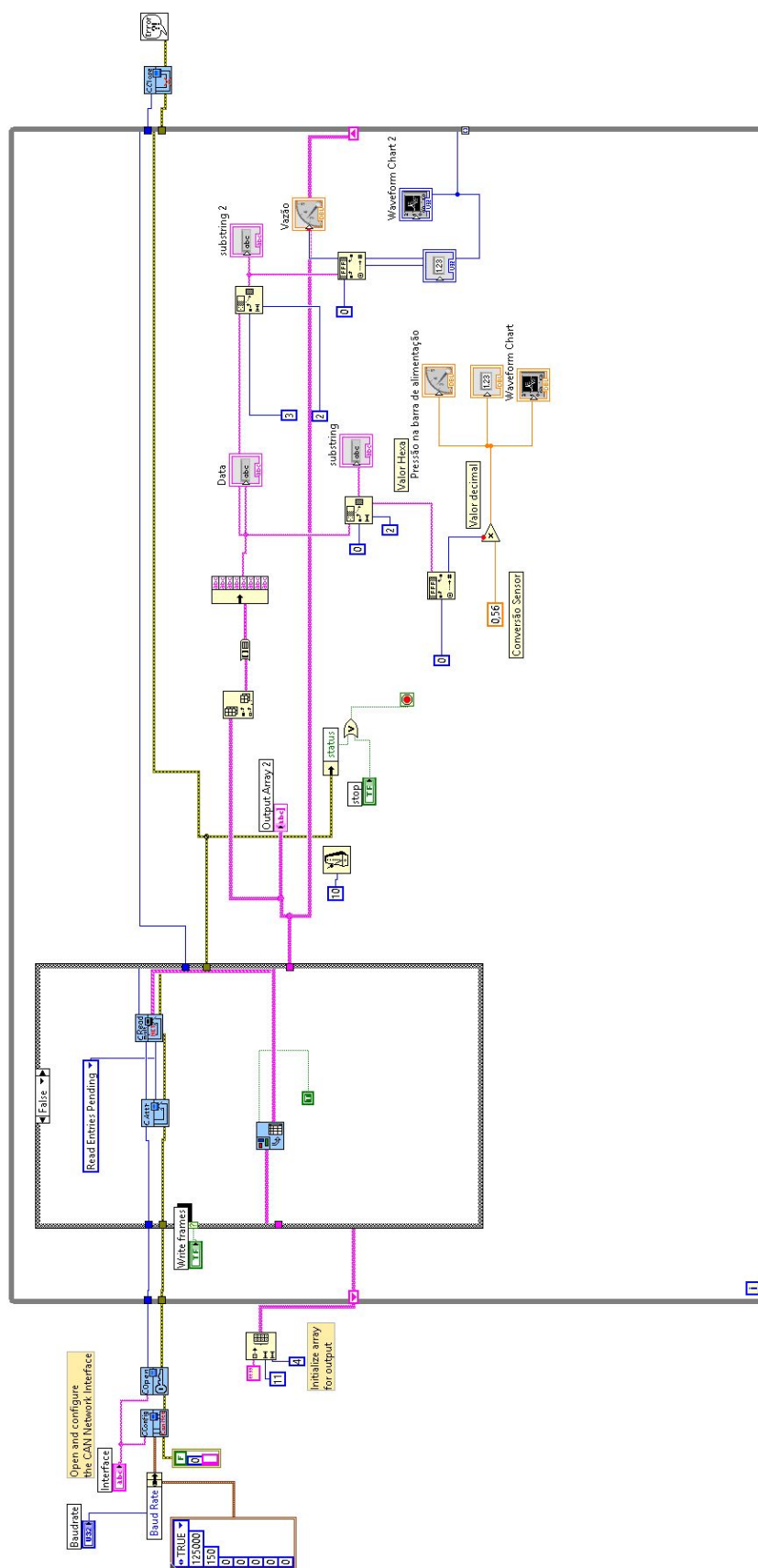


Figura 34 – Diagrama de blocos do VI da ECU de controle na situação de recepção de mensagens