EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

**Desenvolvimento de uma Ferramenta de Análise de Desempenho de Redes
CAN (Controller Area Network) para Aplicações em Sistemas Agrícolas**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia.

Programa de Pós Graduação: Engenharia
Mecânica
Área de Concentração: Manufatura
Orientador: Ricardo Yassushi Inamasu

**São Carlos
2007**

*Aos meus pais, Antônio e Terezinha, pelo
fato de sempre acreditar e nunca desistir.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ricardo Yassushi Inamasu pela amizade, companheirismo, aprendizagem e orientação.

Ao Professor Arthur José Vieira Porto pela oportunidade oferecida, pela dedicação e busca contínua de melhorias para a Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao colega doutorando Rafael Vieira de Sousa que com seu conhecimento me ajudou nas atividades relacionadas a esse trabalho.

A todos os novos amigos e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, em especial aos do Laboratório de Simulação e Controle, pela convivência e colaboração.

Aos amigos da minha cidade Rio Claro, minha namorada e a minha família pelo apoio e incentivo nas horas de desânimo e pela alegria e descontração nas horas de felicidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro à realização desta pesquisa.

RESUMO

GODOY, E. P. **Desenvolvimento de uma Ferramenta de Análise de Desempenho de Redes CAN (Controller Area Network) para Aplicações em Sistemas Agrícolas**. 2007. 93f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Este trabalho tem base na demanda de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias de redes de comunicação (*fieldbus*) que visam à integração de sistemas de automação e controle para aplicações em sistemas agrícolas. Sistemas agrícolas relacionados com as práticas da Agricultura de Precisão, com sistemas embarcados em máquinas e implementos agrícolas e com sistemas de controle de estufas e criadouros. É fundamentado também pelos esforços conjuntos no sentido de promover padronização e implementação da norma ISO11783, baseada no CAN, que dê suporte às práticas agrícolas relacionadas com a aquisição e transmissão de grande quantidade de dados. Um dos principais desafios associados ao projeto e utilização de redes de comunicação como o CAN, está relacionado à dificuldade de definição dos parâmetros de configuração para um bom desempenho da rede. O dimensionamento desses parâmetros exerce forte influência no desempenho da rede analisada. Sob o contexto destas necessidades relacionadas, este trabalho apresenta a pesquisa e o desenvolvimento de uma ferramenta de análise de desempenho de redes *fieldbus* baseada no protocolo CAN para integração de dispositivos em aplicações em sistemas agrícolas. As etapas desse desenvolvimento consistem na sistematização e validação de um modelo matemático do enlace de dados da rede, na proposta de uma metodologia de análise de parâmetros de configurações relacionados com a rede e na implementação computacional dessa metodologia. Espera-se que a metodologia implementada seja uma ferramenta que facilite tarefas de análise e obtenção de dados referentes às aplicações. O resultado deste trabalho busca auxiliar no dimensionamento de parâmetros de configuração e na otimização de redes CAN, além de fornecer dados que ajudam no desenvolvimento de soluções baseadas no protocolo CAN e na norma ISO11783.

Palavras-chave: Controller Area Network - CAN, ISO11783, ISOBUS, eletrônica embarcada, modelo matemático, metodologia de análise

ABSTRACT

GODOY, E. P. Development of a Performance Analysis Tool of CAN-Based Networks for Application in Agricultural Systems. 2007. 93f. Dissertation (Master of Science) – School Engineering of São Carlos, University de São Paulo, São Carlos, 2007.

This work has base in the demand of research and development of data communication networks (fieldbus) to support the integration of control and automation devices for applications in agricultural systems. Agricultural systems related with the Precision Agriculture practices, with the embedded systems in agricultural machinery and with the greenhouses control and livestock systems. It is also guided by the efforts on the implementation of ISO11783 standard. The ISO11783 (also called ISOBUS) standard communication link is a common tendency to integrated different devices on agricultural machinery through an embedded control network. The ISOBUS use the Controller Area Network (CAN) as a data link protocol to perform the data communication. The correct definition of the data link configuration parameters represents one of the main challenges related to the design of CAN-based networks. The definition of these parameters has influence in the performance of the analyzed network. This work presents the research and the development of a performance analysis tool of CAN-based networks for applications in agricultural systems. This development consists of the systematization and validation of a CAN mathematical model. An analysis methodology is proposed to use the mathematical model. A simulation software was built and implements the methodology. It is expected that the implemented methodology facilitates the analysis tasks of the configuration parameters of the applications. The result obtained may assist in the performance evaluation and in the definition of an optimized configuration for the network based on CAN protocol and ISO11783 standard.

Keywords: Controllor Area Network – CAN, ISO11783, ISOBUS, embedded electronics, mathematical model, and analysis methodology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Conexão de Equipamentos via Rede CAN (SOUSA, 2002)	12
Figura 2 – Níveis de Tensão Especificados para o CAN (GUIMARÃES, 2003)	23
Figura 3 – Mecanismo de Acesso ao Meio do CAN (Adaptado de CIA, 2005)	24
Figura 4 – Formato do Quadro de Mensagens CAN (Adaptado de SOUSA 2002).....	24
Figura 5 – Rede ISO11783 em Máquina e Implemento (Adaptado de SOUSA, 2002).....	27
Figura 6 – Campos do Identificador e Formação das PDU (SOUSA, 2002)	28
Figura 7 – Relação entre Período de Amostragem e Desempenho do Sistema de Controle via Rede CAN (Adaptado de LIAN et al., 2006)	32
Figura 8 – Tempos da Transmissão de uma Mensagem CAN entre Nós (Adaptado de LIAN, MOYNE & TILBURY, 2002).....	37
Figura 9 - Diagrama Temporal da Transmissão de uma Mensagem CAN (Adaptado de LIAN, 2001).....	37
Figura 10 – Diagrama de Transmissão de Dados do Período de Amostragem T1 da Metodologia de Otimização (TIPSUWAN & CHOW, 2003)	44
Figura 11 – Fluxograma de Utilização da Metodologia de Análise	47
Figura 12 – Tela Inicial do Programa de Simulação de Redes CAN	52
Figura 13 – Tela de Entrada de Dados 1 do Programa de Simulação de Rede CAN.....	53
Figura 14 – Mensagens Possíveis Relacionadas à Parte de Validação de Dados.....	53
Figura 15 – Tela de Entrada de Dados 2 do Programa de Simulação de Rede CAN.....	54
Figura 16 – Tela de Saída de Dados do Programa de Simulação de Rede CAN	55
Figura 17 – Planilha Eletrônica “Info Utilização” do Relatório de Resultados Gerados	56
Figura 18 – Planilha Eletrônica “Saída de Dados” do Relatório de Resultados Gerados	57
Figura 19 – Esquemático do Circuito da Interface CAN Padrão, (BRAZ et. al. 2004)	58
Figura 20 - Imagem da Interface CAN Implementada	59
Figura 21 – Esquema de Desenvolvimento de Programas e Rotinas para o Experimento.....	60
Figura 22 – Bancada de Montagem da Rede CAN para o Experimento de Validação	61
Figura 23 – Protocolo Proposto para Comunicação entre ECU e PC	61
Figura 24 – Comportamento de Operação da Rede CAN com Dados do Programa de Simulação	66

Figura 25 – Fluxograma do Processo de Medição e Coleta de Dados da Rede CAN Experimental.....	67
Figura 26 – Comportamento de Operação da Rede CAN com Dados Experimentais	70
Figura 27 – Comparação dos Resultados Obtidos para o Parâmetro Tempo de Resposta para as Simulações de Operação da Rede CAN	71
Figura 28 – Síntese dos Resultados Obtidos para o Parâmetro Taxa de Utilização do Barramento para as Simulações de Operação da Rede CAN: (a) Comparação dos Resultados, (b) Sobreposição dos Comportamentos	72
Figura 29 – Estrutura do Robô Agrícola Móvel e Equipamentos Conectados pela Rede CAN	75
Figura 30 – Comparação dos Resultados das Simulações de Operação da Rede CAN	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Visão Geral da Norma ISO11783.....	26
Tabela 2 – Composição e Funções dos Campos do PDU da Norma ISO11783	28
Tabela 3 – Descrição dos Valores do Campo <i>PDU Format</i>	29
Tabela 4 – Descrição dos Parâmetros de Configuração de Redes CAN	31
Tabela 5 – Descrição dos Parâmetros de Desempenho de Redes CAN	33
Tabela 6 – Valor das Variáveis da Equação (2) para os Tipos de Mensagem CAN	40
Tabela 7 – Dados Definidos para a Utilização do Modelo Proposto.....	46
Tabela 8 – Definição das Mensagens de acordo com a ISO11783 para a Rede CAN Analisada	63
Tabela 9 – Valores Definidos para Endereçamento das Mensagens	64
Tabela 10 – Caracterização do Conjunto de Mensagens da Rede CAN do Experimento de Validação	64
Tabela 11 – Resultados Obtidos com a Aplicação do Programa de Simulação para a Rede CAN do Experimento – Simulação 1	65
Tabela 12 – Parâmetros Alterados do Conjunto de Mensagens da Rede CAN do Experimento	65
Tabela 13 – Resultados Coletados da Rede CAN Montada para o Experimento – Simulação 1	69
Tabela 14– Comparação dos Resultados Obtidos para Rede CAN do Experimento de Validação – Simulação 1	70
Tabela 15 – Caracterização do Conjunto de Mensagens da Rede CAN do Robô Agrícola.....	76
Tabela 16 – Tempo de Transmissão do Conjunto de Mensagens da Rede CAN com Esquema de Prioridades P1	77
Tabela 17 – Valores de Otimização e Taxas de Utilização para a Rede CAN.....	77
Tabela 18 – Resultados das Simulações para Determinação do Esquema de Prioridades para o Conjunto de Mensagens da Rede CAN	78
Tabela 19 – Especificações dos Parâmetros Alterados em Relação ao Conjunto de Mensagens da Rede CAN para Simulações de Operação do Robô Agrícola.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAE	The American Society of Agricultural Engineers
CAN	Controller Area Network
CIA	CAN in Automation
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECU	Electronic Control Unit
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
GPS	Global Positioning System
I2C	Inter-Integrated Circuit
ISO	International Organization for Standardization
LBS	Landwirtschaftliches BUS System
NDBA	Non-Destructive Bitwise Arbitration
NCS	Networked Control System
OSI	Open Systems Interconnection
PC	Personal Computer
PDU	Protocol Data Unit
PG	Parameter Group
PGN	Parameter Group Number
POLI	Escola Politécnica da USP
SAE	The Society of Automotive Engineers
SPI	Serial Peripheral Interface
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Motivação	11
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Estrutura e Conteúdo	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Considerações Iniciais	16
2.2 Protocolo CAN	16
2.3 Análise de Desempenho	19
2.4 Considerações Finais	21
3. REVISÃO TEÓRICA OU CONCEITUAL	22
3.1 Considerações Iniciais	22
3.2 Sistematização do Protocolo CAN	22
3.2.1 Conceituação.....	23
3.2.2 Padronização na Área Agrícola	25
3.2.3 ISO11783	25
3.3 Sistematização da Análise de Desempenho.....	29
3.4 Considerações Finais	33
4. PROPOSTA DA FERRAMENTA DE ANÁLISE	35
4.1 Considerações Iniciais	35
4.2 Definição do Método de Avaliação de Desempenho	35
4.3 Estudo Temporal.....	36
4.4 Sistematização do Modelo	39
4.4.1 Tempo de Transmissão – Operação sob Condições Normais	39
4.4.2 Tempo de Transmissão – Operação sob Condições de Erro	41
4.4.3 Taxa de Utilização e Otimização	43
4.5 Metodologia de Análise	46
4.6 Considerações Finais	48
5. IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA DE ANÁLISE	49
5.1 Considerações Iniciais	49
5.2 Desenvolvimento do Programa de Simulação	49
5.2.1 Especificações e Características	49
5.2.2 Apresentação e Descrição do Funcionamento	51
5.3 Validação do Programa de Simulação	57
5.3.1 Montagem da Rede CAN Experimental	57
5.3.2 Dados da Aplicação do Programa.....	64
5.3.3 Dados da Rede CAN Experimental	66
5.3.4 Comparação dos Resultados	70
5.4 Propostas de Análise e Utilização do Programa	73
5.4.1 Análise para o Robô Agrícola Móvel	74
5.5 Considerações Finais	81
6. CONCLUSÕES	82
6.1 Contribuições	83
6.2 Trabalhos Futuros	84
REFERÊNCIAS	86

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O aumento do uso da eletrônica digital e da troca de informações entre dispositivos provocaram o surgimento de novas tecnologias de conexão de equipamentos. Arquiteturas distribuídas de automação são caracterizadas por redes de dispositivos de campo, usualmente conectadas através de um barramento de comunicação, chamado de barramento de campo (*fieldbus*). Essa tecnologia de redes de comunicação *fieldbus*, com suas vantagens, foi rapidamente absorvida para satisfazer as necessidades de comunicação entre sistemas e equipamentos aplicados em automação e controle. Em sistemas deste tipo, a instrumentação é constituída por dispositivos sensores e atuadores, capazes de executar processamento local e comunicar-se entre si. Os benefícios tecnológicos e funcionais obtidos através da utilização de barramentos de campo, fazem desta solução uma das mais adotadas em automação e controle. De acordo com Farsi, Ratcliff & Barbosa (1999), entre as vantagens da utilização deste tipo de arquitetura distribuída ou tecnologia *fieldbus*, podem-se citar:

- ü Quantidade reduzida de cabeamento da rede;
- ü Menor tempo de instalação e maior robustez do sistema;
- ü Flexibilidade e facilidade para ampliação do sistema;
- ü Disponibilidade e viabilidade econômica.

Com o surgimento desta tecnologia e sua conseqüente utilização, diversos tipos de barramentos de campo surgiram, como o CAN – Controller Area Network, Interbus (INTERBUS, 2006), Profibus (PROFIBUS, 2006), Modbus (MODBUS, 2006), Foundation (SMAR, 2006). Entre essas possibilidades, uma das mais difundidas em diferentes áreas foi o

CAN, um protocolo de comunicação serial digital. O protocolo CAN foi desenvolvido na década de oitenta por Robert Bosch Gmb para promover a interconexão de dispositivos de controle em automóveis (BOSCH, 2006), mas em poucos anos esta tecnologia migrou para outras áreas (FARSI, RATCLIFF & BARBOSA, 1999). Atualmente, encontram-se padrões baseados no CAN para aplicações em diversas áreas como automotiva, industrial, robótica e agrícola. A Figura 1 exemplifica a conexão de equipamentos através de uma rede CAN.

Como ressalta Sousa (2002), a potencialidade para aplicações com CAN em sistemas de automação e controle é sustentada por características próprias para tais sistemas, como:

- Possibilidade de configurações de taxas de comunicação de poucos Kb/s até 1 Mb/s;
- Comunicação de dados utilizando dois fios, o que reduz o custo e complexidade e promove proteção às interferências eletromagnéticas;
- Utilização de um método de arbitragem de acesso ao barramento que evita colisões;

Figura 1 - Exemplo de Conexão de Equipamentos via Rede CAN (SOUSA, 2002)

Na área agrícola, observa-se um aumento da utilização da informática e da automação para apoiar novas práticas relacionadas com a Agricultura de Precisão, como os sistemas eletrônicos de coleta de dados e os sistemas para aplicação de insumos a taxa variável. Também a expansão do uso da automação em sistemas agrícolas, como máquinas e implementos, controle de estufas e sistemas de armazenamento, irrigação e confinamento de animais têm intensificado a demanda pela pesquisa e desenvolvimento dessas redes de

comunicação. O protocolo CAN apresenta importância crescente e sua utilização na área agrícola é confirmada internacionalmente, em Auernhammer & Speckmann (2006), e nacionalmente, em Sousa (2002). Constatam-se também, os esforços de instituições de pesquisa, associações de normas e fabricantes de máquinas e implementos pela sua padronização. Tais esforços podem ser verificados pelo desenvolvimento de padrões como DIN9684, SAEJ1939 e ISO11783, sendo que este último constitui, atualmente, o principal alvo de implementação e desenvolvimento.

Configurações de sistemas de controle que utilizam o barramento CAN podem ser consideradas como sistemas de controle distribuído. Aplicações de sistemas distribuídos demandam novas metodologias e ferramentas de simulação e análise de desempenho (CERVIN et al., 2003), para atender às necessidades de dimensionamento e otimização do funcionamento do sistema, reduzindo custos relacionados com projeto e implementação. A abordagem proposta no trabalho Tindell, Burns & Wellings (1995) tornou-se referência em análise de redes baseadas no protocolo CAN. Adaptações e variações desta abordagem de análise podem ser encontradas, como em Upender & Dean (1996) e em Punnekkat, Hansson & Norstrom (2000), demonstrando sua importância para outras áreas de aplicação. Entretanto, apesar da utilização de modelos de análise de rede CAN estar presente em várias áreas de aplicação, não existem relatos de metodologias e ferramentas de análises para aplicações agrícolas baseadas em tal abordagem.

Assim, orientando-se pelas necessidades citadas, realizou-se neste trabalho o desenvolvimento, a validação e a aplicação de uma metodologia de análise, baseada na sistematização de um modelo matemático de redes CAN, para aplicações na área agrícola. A metodologia é implementada em um programa computacional de simulação com a finalidade de facilitar tarefas de análises de parâmetros de desempenho, como o tempo de resposta de mensagens e taxa de utilização do barramento, e de armazenamento de resultados das

simulações. O programa pode auxiliar no projeto e dimensionamento de parâmetros de configuração de redes CAN, como velocidade de transmissão do barramento, tamanho das mensagens de dados, esquema de prioridade das mensagens e período de amostragem dos dispositivos.

Observa-se que o programa desenvolvido neste trabalho também ofereceu com sucesso suporte ao projeto FAPESP 03/06582-0. Este projeto envolveu a montagem e análise de uma rede CAN embarcada (o termo embarcado representa todo e qualquer sistema eletro-eletrônico montado em uma aplicação móvel) para integrar diferentes dispositivos para o sistema de um robô agrícola móvel (RAM). Tal projeto foi desenvolvido através de parceria entre o Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP e a Embrapa Instrumentação Agropecuária de São Carlos (PORTO et al., 2003).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta metodológica de análise de desempenho de redes *fieldbus* baseada no protocolo CAN para integração de dispositivos em aplicações em sistemas agrícolas. Esta ferramenta de análise, desenvolvida sob a forma de um programa computacional de simulação, teve como requisitos funcionais:

- Permitir estudos de simulação e análise de desempenho da rede CAN sob configurações e características diferenciadas, através da implementação computacional da metodologia de análise proposta;
- Permitir o dimensionamento dos parâmetros de configuração e uma otimização do funcionamento da rede CAN;

- ü Auxiliar na implementação de redes CAN em sistemas agrícolas e permitir o desenvolvimento de dispositivos e tecnologias relacionadas com a norma ISO11783.

1.3 ESTRUTURA E CONTEÚDO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos e uma lista de referências bibliográficas. Esta estrutura apresenta os tópicos envolvidos nas etapas de desenvolvimento, validação e aplicação de uma ferramenta de análise de redes CAN para aplicações na área agrícola.

Neste **Capítulo 1 – Introdução**, estão apresentadas as justificativas para a realização deste trabalho bem como seus objetivos e conteúdo e organização. No **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica**, são apresentados os conceitos e fundamentos que suportam o desenvolvimento deste trabalho. No **Capítulo 3 – Revisão Teórica ou Conceitual**, é apresentado uma visão geral sobre o protocolo CAN e são discutidos os parâmetros e dados geralmente utilizados na análise de desempenho de redes CAN. No **Capítulo 4 - Proposta da Ferramenta de Análise**, são apresentadas detalhadamente todas as etapas do desenvolvimento da ferramenta de análise proposta. No **Capítulo 5 - Resultados e Discussões**, são apresentadas as características do programa computacional implementado, bem como sua validação e possibilidades de aplicação, com o exemplo de um caso de estudo. No **Capítulo 6 – Conclusões**, são apresentadas conclusões e contribuições deste trabalho e as perspectivas e melhorias relacionadas ao tema. A Lista de **Referências** é apresentada em ordem alfabética e contém todos os documentos referenciados no decorrer deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentado o embasamento bibliográfico deste trabalho. Diversos trabalhos que apresentam o histórico do desenvolvimento e o estado da arte atual em relação à padronização e à aplicação do protocolo CAN são apresentados. Também são abordados trabalhos relacionados com o desenvolvimento de ferramentas e metodologias de análise de desempenho de redes para aplicações em sistemas agrícolas.

2.2 PROTOCOLO CAN

Tem-se verificado recentemente, um avanço na utilização de tecnologias de automação e computação para aplicações em sistemas agrícolas e em novas práticas relacionadas com a Agricultura de Precisão (SIGRIMIS et al., 2000). Dentre esses sistemas agrícolas, estão os compostos por aplicações em máquinas e implementos, veículos autônomos, robôs móveis e no gerenciamento de estufas e criadouros. Já em relação às práticas agrícolas, estão as relacionadas com a aquisição de dados em campo, o estudo da variabilidade espacial e a aplicação de insumos a taxa variada. Essas aplicações têm demandado um número crescente de pesquisas em sensores embarcados e redes de comunicação (STONE et al., 1999), metodologias e dispositivos para medidas em movimento (*on-the-go*) (AUERNHAMMER, 2001). Para a utilização dessas aplicações, é necessário também certo grau de automação (MOLIN, 2004), que depende de algumas tecnologias recentes apenas adaptadas para o meio

agrícola como é o caso dos sistemas de posicionamento por satélites e sistemas de informação geográfica.

A troca de informações necessária entre os dispositivos utilizados nessas aplicações pode originar um sistema centralizado bastante complexo. Assim o desenvolvimento de um sistema de controle distribuído constitui uma solução, senão necessária, muito bem vinda. Esta grande quantidade de dispositivos inteligentes deve ser interconectada e compartilhar, da melhor maneira possível, os dados disponíveis na aplicação. Esta interconexão e compartilhamento são realizados através dos chamados Protocolos de Comunicação.

Uma tecnologia que vem sendo amplamente utilizada nessa interconexão de dispositivos é o CAN, um protocolo de comunicação serial digital amplamente aplicado na área agrícola. Na área de sistemas agrícolas, a utilização do protocolo CAN é confirmada em Auernhammer (2004) e em Suvinen & Saarilahti (2006) e sua aplicação como tecnologia para conexão de dispositivos para veículos autônomos e robôs móveis é vista como forte tendência (NAGASAKA et al., 2004; DARR, STOMBAUGH & SHEARER, 2005). Serôdio et al. (2001) apresentam a aplicação do CAN em um sistema de gerenciamento de estufas. Darr et al. (2005) avaliam a transmissão de dados através de uma rede CAN para longas distâncias e Spreng, Rothmund & Auernhammer (2006) utilizam o CAN como tecnologia para interconexão de equipamentos, sendo que ambos os trabalhos consistem em aplicações para sistemas de monitoramento de criadouros. Para o caso da área relacionada à Agricultura de Precisão, Darr et al. (2003) apresentam um sistema de aquisição de dados em campo (coordenadas GPS e velocidade) baseado no protocolo CAN para um sistema de pulverização. Oksanen et al. (2004) demonstram a utilização do protocolo CAN no desenvolvimento de uma plataforma aberta e configurável de aquisição de dados e aplicação de insumos (semente e fertilizante) a taxa variada para utilização em máquinas e implementos.

Desde a década de 80, observa-se a necessidade de uma padronização para o protocolo CAN em aplicações agrícolas, quando se iniciou a elaboração da norma DIN9684. Sistematizações das principais partes desta norma podem ser vistas em Jahns & Speckmann (1999) de forma a auxiliar sua implementação. Na década de 90, iniciou-se nos Estados Unidos o desenvolvimento de padrões baseados no CAN para a área agrícola. Potenciais aplicações e características da norma SAEJ1939 são apresentadas por Stone & Zachos (1993). Um histórico do desenvolvimento das normas acima citadas e dos esforços conjuntos das associações DIN, SAE, ASAE com a associação de normas internacional ISO para desenvolvimento de uma norma internacional denominada ISO11783 é apresentado por Stone et al. (1999). Com a disponibilidade da documentação da norma ISO11783, pesquisas baseadas em implementações deste padrão começaram a surgir no final da década de 90, e seus benefícios podem ser observados em diferentes aplicações de campo (LANG et al., 1999; AUERNHAMMER & ROTHMUND, 2004 e OKSANEN et al., 2005). O trabalho de Miettinen et al. (2006) apresenta o desenvolvimento de um controlador de tarefas compatível com a norma ISO11783. Atualmente, a norma ISO11783, também denominada ISOBUS, está em fase de desenvolvimento e uma revisão desse estado de implementação pode ser observada em Benneweis (2005).

No Brasil, trabalhos pioneiros como Saraiva e Cugnasca (1998) e Cugnasca (2002) já apontavam à necessidade da pesquisa e desenvolvimento do protocolo CAN. Aplicações desse protocolo em Strauss (2001), Sousa (2002), Guimarães (2003) demonstram essa tendência de utilização. Já o trabalho Porto, Sousa & Inamasu (2005) apresenta uma proposta de desenvolvimento de um robô agrícola móvel conectado por uma rede CAN. Em relação à norma ISO11783, a busca por sua implementação e difusão no mercado brasileiro pode ser verificada pelo esforço conjunto de instituições de pesquisa (POLI / EESC / ESALQ – USP) e de empresas de máquinas e implementos (AGCO, John Deere, Case New Holland, Jupil)

com a criação de um grupo de estudos denominado Força Tarefa ISOBUS Brasil. Reuniões dessa Força Tarefa já foram realizadas em eventos como congressos (Congresso Brasileiro de Agroinformática 2005, Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão 2006) e feiras (Agrishow 2005, 2006) para discussões sobre o assunto. Está prevista a realização do primeiro “plug-fest”, com exposição de hardwares e equipamentos compatíveis com a ISO11783, para o primeiro semestre de 2007.

2.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Tipicamente, em sistemas de automação e controle, as especificações requerem que a atuação sobre o sistema controlado seja conforme especificado, tanto do ponto de vista lógico, como também do ponto de vista temporal. Em sistemas distribuídos fundamentados em redes de campo, como a rede CAN, isto não é diferente, de modo que cada dispositivo conectado possui um nível de prioridade para acessar o barramento e um período de tempo (*deadline*) em que sua mensagem deve ser transmitida, sem que haja prejuízo para o sistema de controle.

Aplicações têm demonstrado que a rede CAN oferece boas propriedades para transmissão de mensagens com requisitos temporais (LIAN, MOYNE & TILBURY, 2001). Além disso, mostra-se importante a proposta de estudos para a rede sob situações como a presença de *Jitter* (explicado na seção 4.3) no conjunto de mensagens e o funcionamento com alta carga de mensagens. Assim, em aplicações de sistemas distribuídos tem sido comum a busca pelo desenvolvimento de modelos e experimentos para análise de desempenho, os quais permitam o dimensionamento e a otimização do funcionamento desses sistemas, como mostrado em exemplos em Jain (1991).

Os trabalhos Tindell & Burns (1994) e Tindell, Burns & Wellings (1995) tornaram-se referência em equações de análise de redes baseadas no protocolo CAN. A partir destes trabalhos, diversas abordagens desses métodos de análise de rede CAN podem ser encontradas, como análises de atraso (*delay*) de comunicação em Upender & Dean (1996) e análises de desempenho de um sistema de controle sob condições de erros em Punnekkat, Hansson & Norstrom (2000) para aplicações automotivas. Também, Jeon et al. (2001) apresentam um estudo de viabilidade de aplicação de uma arquitetura distribuída em um AGV (*Automated Guided Vehicles* – Veículo Auto-Guiado) e Santos, Stemmer & Vasquez (2002) descrevem uma análise de escalonabilidade de mensagens de uma rede CAN para um helicóptero autônomo. Trabalhos recentes como Brill et al. (2006) e Davis et al. (2006) reforçam a importância dessas equações de análise e apresentam novas discussões e adaptações.

Diversos trabalhos abordam análises de desempenho entre redes de controle para aplicações industriais. Lian, Moyne e Tilbury (2001) apresentam uma análise de desempenho entre redes Ethernet, CAN e Controlnet, na qual os resultados demonstram que o protocolo CAN mostra melhor desempenho em sistemas com mensagens de tamanho reduzido. Já Benito et al. (1999), analisam o desempenho de redes CAN, Profibus e Modbus para situações de mensagens periódicas e não periódicas. Lian et al. (2006) apresentam uma abordagem de estudo da relação entre o tempo de amostragem das mensagens e o desempenho de sistemas de controle via redes, o qual pode ser aplicado para redes CAN.

Na área agrícola, Hofstee & Goense (1997, 1999) apresentam resultados referentes à simulação de operação de uma rede CAN, com parâmetros baseados na norma DIN9684 e ISO11783, respectivamente, para uma configuração de trator e implemento. Silva (2003) apresenta o desenvolvimento de um simulador da dinâmica da troca de mensagens em redes

baseadas na norma ISO11783. Uma abordagem de modelagem e análise de redes CAN através da ferramenta Redes de Petri Coloridas pode ser vista em Lopes et al. (2005).

Entretanto, apesar da utilização de modelos de análise de rede CAN estar presente em várias áreas de aplicação e ter sua importância comprovada, de acordo com os trabalhos apresentados, não há metodologias e ferramentas de análises para aplicações agrícolas baseadas nas abordagens propostas por Tindell & Burns (1994) e Tindell, Burns & Wellings (1995). Norteado pelas necessidades citadas, o desenvolvimento e a aplicação de uma ferramenta de análise de desempenho de redes CAN adquirem grande importância e potencial para aplicações em sistemas agrícolas.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica relacionada ao protocolo CAN e o desenvolvimento de análise de desempenho desse tipo de rede. Pode-se perceber que a aplicação do protocolo CAN em sistemas agrícolas é fato consolidado e que ultimamente vêm ocorrendo esforços no sentido da implementação da norma ISO11783. O desenvolvimento de uma ferramenta de análise de desempenho desse tipo de rede apresenta grande potencial e importância e é um assunto que, de acordo com a revisão, ainda não está difundido em aplicações do CAN para sistemas agrícolas.

3. REVISÃO TEÓRICA OU CONCEITUAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para realizar uma tarefa de análise de desempenho, divide-se o conhecimento do sistema de controle distribuído em dois fatores. Primeiramente o conhecimento do sistema de controle a ser analisado, no caso o protocolo CAN. Em seguida o conhecimento dos parâmetros e dados, relacionados ao protocolo escolhido, que exercem influência no desempenho do sistema de controle.

Neste capítulo é realizada uma revisão conceitual sobre o protocolo CAN e sobre a importância da análise de desempenho de sistemas de controle via rede CAN. Nessa revisão foram sistematizados, em relação ao protocolo CAN, os conceitos mais importantes para o entendimento das etapas posteriores do trabalho. Dentre esses conceitos, cita-se o mecanismo de arbitragem do protocolo, a implementação da norma ISO11783 e os métodos e parâmetros que podem e vêm sendo utilizados em análise de desempenho de redes CAN.

3.2 SISTEMATIZAÇÃO DO PROTOCOLO CAN

Define-se para este trabalho que um barramento de comunicação (CAN) é composto pelo meio físico de transmissão de dados (cabearamento) e seus conectores, definidos de acordo com o protocolo escolhido (CAN). Já uma rede CAN é composta pelo conjunto dos dispositivos eletrônicos conectados (sensores e atuadores), pelo barramento de comunicação e pelas interfaces de comunicação (hardware que implementa a comunicação entre os dispositivos eletrônicos através do barramento).

3.2.1 Conceituação

Como descrito em Sousa (2002) e em Guimarães (2003), o CAN é um protocolo de comunicação digital serial, onde a comunicação de dados é baseada em mensagens formadas por quadros de bits com determinada função. Entre esses quadros de bits, existe o campo identificador (ID - *identifier*) que caracteriza e define a prioridade de cada mensagem. O valor do identificador de uma mensagem em uma rede CAN é exclusivo e quanto mais baixo seu valor, maior será a prioridade da mensagem. Os sinais elétricos digitais do CAN são representados pelo nível recessivo (nível lógico 1) e nível dominante (nível lógico 0), sendo eles sinais diferenciais entre os dois fios do barramento (condutores CAN_H e CAN_L), como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Níveis de Tensão Especificados para o CAN (GUIMARÃES, 2003)

O mecanismo de acesso ao meio é fundamentado no conceito CSMA/NDBA - *Carrier Sense Multiple Access with Non-Destructive Bitwise Arbitration* (Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora com Arbitragem Não Destrutiva por Operação Lógica Bit-a-Bit) que significa que os módulos (nós CAN) possuem acesso ao barramento com prioridades determinadas. De acordo com a Figura 3, ao verificar o estado do barramento, os módulos iniciam a transmissão de suas mensagens. De acordo com o valor do identificador, o módulo com a mensagem de prioridade menor cessa sua transmissão e o módulo com a mensagem de

maior prioridade continua enviando sua mensagem deste ponto, sem ter que reiniciá-la. Isto é realizado pelo processo de arbitragem bit a bit não destrutivo, ou lógica "E" por fios, quando dois ou mais módulos iniciam a transmissão simultaneamente. Cada bit transmitido é comparado, sendo que o dominante sobrepõe o recessivo.

Figura 3 – Mecanismo de Acesso ao Meio do CAN (Adaptado de CIA, 2005)

Dentre as especificações do protocolo CAN em relação à camada de enlace de dados, estão os dados relacionados aos formatos existentes do quadro de dados. São definidos dois formatos de quadros dados de mensagem, onde a única diferença está no tamanho do identificador, sendo CAN A *Standard* (ID 11 bits) e CAN B *Extended* (ID 29 bits) especificados segundo a Figura 4.

Figura 4 – Formato dos Quadros de Mensagens CAN (Adaptado de SOUSA, 2002)

3.2.2 Padronização na Área Agrícola

Como podem ser vistos em Guimarães (2003), os fundamentos do CAN são especificados por duas normas: a ISO11898 e a ISO11519-2. Ambas especificam as características das camadas Física e de Enlace de Dados, respectivamente 1 e 2 do modelo rede de comunicação OSI (*Open System Interconnection*) de 7 camadas. As demais camadas, (3 a 7), são especificadas por outros protocolos, relacionados às aplicações específicas entre as diversas áreas de utilização do CAN.

Para o caso da área agrícola (SOUSA, 2002), entre os padrões mais representativos e fundamentados no CAN, pode-se citar:

- ü DIN9864: Especificado pela associação de normas da Alemanha. Baseado na versão 2.0A do CAN, e adotou e influenciou algumas especificações de padrões da ISO;
- ü SAEJ1939: Desenvolvido para aplicação em veículos de terra de grande porte como caminhões, ônibus, tratores, incluindo máquinas e implementos agrícolas. Baseado na versão CAN 2.0B do CAN;
- ü ISO11783 (ISOBUS): As atividades de normalização pela ISO para este padrão para aplicações em máquinas e implementos agrícolas estão sendo concluídas. Possui diversas especificações iguais ao padrão SAE J1939 e ao DIN 9684.

3.2.3 ISO11783

O ISO11783 - *Tractors and machinery for agriculture and forestry – Serial control and communications data network* - é um padrão de comunicação baseado no CAN 2.0B desenvolvido para a interconexão de sistemas eletrônicos em máquinas e implementos agrícolas. O comitê da ISO responsável por essa norma é o TC23/SC19/WG1 e está com os

trabalhos em fase de conclusão. Muitas especificações deste padrão foram baseadas na norma DIN 9684 e na norma SAE J1939, como a velocidade de transmissão do barramento de 250 Kbits/s. A Tabela 1 apresenta uma visão geral sobre as partes que compõe essa norma e sua situação de desenvolvimento, de acordo com Vector CANtech (2006). São apresentadas as seguintes abreviaturas para melhor entendimento da Tabela 1:

- Ü IS – *International Standard* = Parte publicada do Padrão Internacional;
- Ü FDIS – *Final Draft International Standard* = Versão final do rascunho da parte;
- Ü DIS – *Draft International Standard* = Rascunho da parte em fase de análise;
- Ü WD – *Working Draft* = Rascunho da parte em fase de desenvolvimento.

Tabela 1 – Visão Geral da Norma ISO11783

Parte	Título	Escopo	Situação
1	General Standard	Visão geral sobre o padrão e da aplicação de cada parte	FDIS em 08/2006 – IS previsto para 02/2007
2	Physical Layer	Cabos, conectores, sinais elétricos e características mecânicas e elétricas gerais do barramento	IS
3	Data Link Layer	Implementação do CAN e especificação da estrutura das mensagens	DIS – Harmonização com J1939/21
4	Network Layer	Interconexão de sub-redes	IS
5	Network Management	Processo de inicialização e endereçamento de ECU's	IS
6	Virtual Terminal	Especificações do terminal de controle e operação	IS – Modificações em desenvolvimento 12/2006
7	Implement Messages	Definição de mensagens básicas dos implementos e da máquina	IS – Modificações em desenvolvimento 12/2006
8	Power Train Messages	Definição de mensagens automotivas	IS com referência a J1939/71
9	Tractor ECU	Especificações da ECU do Trator	IS
10	Task Controller	Especificação de interfaces e programas computacionais de controle e administração com o barramento	FDIS em 12/2006 – IS previsto para 02/2007
11	Data Dictionary	Definições e identificação de mensagens para elementos da rede	FDIS em 08/2006
12	Diagnostics	Diagnóstico de falhas e processo de identificação de ECU's	DIS em 10/2006
13	File Server	Definições do servidor de dados e mensagens de acesso cliente - servidor	FDIS em 11/2006
14	Automated Functions	Definições para realização de tarefas automatizadas pela máquina (como manobras de final de linha de plantio)	Em desenvolvimento como WD

Em aplicações relacionadas com o CAN e com a ISO11783, o sistema eletrônico que promove a interconexão de um dispositivo ao barramento é denominado *Electronic Control*

Unit (ECU) ou Unidade Eletrônica de Controle. Uma única ECU pode ser responsável pela conexão de um ou mais dispositivos a um barramento. Também um dispositivo pode ser conectado a um barramento por uma ou mais ECU's. O conjunto formado por ECU e dispositivo constitui um nó CAN. A Figura 5 exemplifica a aplicação do padrão ISO em uma rede embarcada em um trator e implemento.

Figura 5 – Rede ISO11783 em Máquina e Implemento (Adaptado de SOUSA, 2002)

Em uma rede baseada na norma ISO11783 toda troca de informações entre as ECU's ou nós CAN do sistema é realizada por mensagens com formato de quadro de dados definido. Como citado, a versão 2.0B do protocolo CAN com identificador de 29 bits é utilizada e são especificados campos específicos, de acordo com a Figura 6, que definem a estrutura PDU (*Protocol Data Unit* – Unidade de Protocolo de Dados), utilizado para endereçamento das mensagens na rede CAN.

Figura 6 – Campos do Identificador e Formação das PDU (SOUSA, 2002)

Os campos que compõe a estrutura PDU de uma mensagem, de acordo com a norma ISO11783, possuem diferentes funções, descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição e Funções dos Campos do PDU da norma ISO11783

Sigla	Descrição	Nº Bits	Função
P	<i>Priority</i> - Prioridade	3	Determinar a prioridade de acesso da mensagem. O menor valor binário deste campo significará maior prioridade e vice-versa.
R	<i>Reserved</i> - Reserva	1	Bit reserva da ISO11783. Deve ser sempre considerado igual a zero para não distorcer a verificação de prioridade.
DP	<i>Data Page</i> - Página de Dados	1	Possibilita o trabalho com duas páginas de Grupos de Parâmetros (PGN)
PF	<i>PDU Format</i> - Formato do PDU	8	Campo utilizado na especificação do tipo da mensagem e na determinação dos PGN's.
PS	<i>PDU Specific</i> - Especificidade do PDU	8	Representa o endereço de destino da mensagem. Depende diretamente do valor do campo PF (Destination Address ou Group Extension).
SA	<i>Source Address</i> – Endereço Fonte	8	É o valor que identifica cada ECU.
DF	<i>Data Field</i> - Campo de Dados	64	Campo de informações (Oito campos de oito bits)

O valor do campo *PDU Format* (oito bits) define qual tipo de mensagem que está sendo transmitida por um nó e especifica o campo *PDU Specific*. Três tipos de mensagens foram criados, como mostra a Tabela 3. O valor 255 para o campo *PDU Format* define uma mensagem como sendo global, assim todos os nós que compõe a rede podem receber esta mensagem. Vale lembrar que o valor do campo que compõe o PDU da mensagem é dado pelo

valor decimal equivalente ao binário do respectivo campo. (Ex. *PDU Format* - 8 bits – Valores de 0 a 255).

Tabela 3 – Descrição dos Valores do Campo *PDU Format*

Formato do PDU	Valor do Campo PDU	Tipo da Mensagem
PDU 1	0 a 239	Específico – ECU ou Global
PDU 2	240 a 254	Global – Grupo de ECU's
Global	255	Global

O formato PDU 1 especifica que o campo *PDU Specific* contém o endereço de destino (*Destination Address*) da mensagem. Isso permite que a mensagem seja enviada para um nó da rede em particular. Caso o valor deste campo *Destination Address* seja 255, a mensagem se torna global. O formato PDU 2 especifica que o campo *PDU Specific* contém o endereço de extensão de grupo (*Group Extension*) da mensagem. Esse campo *Group Extension* é utilizado em nós que possuem a mesma “função na rede” e permite que a mensagem seja enviada para varias nós (ECU's) simultaneamente.

É importante citar que um estudo mais completo de todas as partes da norma ISO11783 é imprescindível para o desenvolvimento de uma aplicação baseada neste padrão. Os assuntos aqui descritos representam uma síntese dos assuntos principais que serão necessários para o entendimento da parte relacionada à montagem e coleta de dados da rede CAN para este trabalho.

3.3 SISTEMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Saber como um sistema se comporta é muito importante para conhecer a capacidade do mesmo. Caso o sistema não esteja implementado, um teste de viabilidade revelaria se ao ser

implementado ele realizaria o que se propõe. No caso de um sistema já implementado, a realização de testes demanda alto custo e grande quantidade de tempo. Por isso muitas vezes é preferível que os experimentos sejam conduzidos em um modelo do sistema (SILVA, 2003).

Na avaliação de desempenho de sistemas de controle devem-se estabelecer quais serão os parâmetros ou dados a serem medidos. Esses parâmetros devem conter todas as informações relevantes na análise do sistema. Outro fator importante é o método através do qual a avaliação será feita. Podem-se utilizar técnicas de avaliação de desempenho para prever o seu comportamento, tais como simulação e métodos analíticos (JAIN, 1991).

Cada método possui suas vantagens e desvantagens. Os métodos analíticos possuem a vantagem de dar uma solução mais geral para o problema, mais econômica e mais eficiente, porém muitas vezes a sua aplicação é limitada pela complexidade do sistema que está sendo modelado. Nesses casos escolhe-se a simulação, por ser um método mais simples de ser implementado e que permite a realização de experimentos sob várias condições com o mesmo modelo, fornecendo resultados gerais para o sistema em estudo. Do ponto de vista prático, simulação é o processo de projetar e criar um modelo computadorizado de um sistema, para conduzir experimentos numéricos, objetivando um melhor entendimento do sistema em um dado conjunto de condições.

Para a análise de desempenho de redes de comunicação, isto não é diferente, de modo que cada projetista define em relação ao tipo e protocolo de comunicação em que sua rede é baseada, os parâmetros mais interessantes a serem analisados. Ressalta-se que essa escolha de parâmetros depende das necessidades de conhecimento da aplicação por parte do projetista e principalmente do método de avaliação escolhido.

De acordo com a literatura, o aumento da utilização do CAN em soluções de comunicação tempo real realça a importância da realização de análises temporais e de desempenho (PINHO & VASQUES, 2001). Para esses tipos de análise de redes baseadas no

protocolo CAN, Godoy, Sousa & Inamasu (2005) descrevem os parâmetros que podem ser analisados e os dividem em dois grupos:

- ü Parâmetros de Configuração: composto pelos dados de configuração do protocolo necessários para a operação da rede, definidos como Dados de Entrada;
- ü Parâmetros de Desempenho: composto pelos dados relacionados ao desempenho do sistema e a operação da rede, definidos como Dados de Saída.

A Tabela 4 apresenta o conjunto dos parâmetros de configuração de redes CAN utilizados em análise de desempenho. É importante lembrar que o parâmetro tamanho do campo de dados de uma mensagem CAN possui uma quantidade máxima de 64 bits.

Tabela 4 – Descrição dos Parâmetros de Configuração de Redes CAN

Nome	Descrição
Formato do quadro de mensagem	Definido entre CAN 2.0A (ID 11 bits) e CAN 2.0B (ID 29 bits)
Número de mensagens	Dado pelo número total de mensagens de dados que trafegam pela rede
Tipo de mensagem	Periódica (transmitida a cada intervalo de tempo) ou não periódica
Velocidade de transmissão	Valor da velocidade de transmissão de dados pelo barramento
Período ou Tempo de amostragem	Intervalo de tempo entre transmissões consecutivas de uma mensagem
Esquema de prioridade	Esquema de prioridades de acesso ao barramento das mensagens que trafegam pela rede
Tamanho do campo de dados das mensagens	Quantidade de bits de dados (<i>data field</i>) de uma mensagem

De acordo com Lian et al. (2006), um dos parâmetros de configuração de NCS (*Networked control system* - sistema de controle via redes de comunicação) que mais exerce influência sobre o desempenho do sistema de controle é o período de amostragem das mensagens que trafegam pela rede. Neste trabalho é apresentado um diagrama que auxilia na visualização deste problema e na tarefa de selecionar tais períodos de amostragem. Na Figura 7 é apresentado este diagrama para a aplicação de um sistema de controle via rede CAN.

Figura 7 – Relação entre Período de Amostragem e Desempenho do Sistema de Controle via Rede CAN
(Adaptado de LIAN et al., 2006)

Para o gráfico da Figura 7, a divisão entre inaceitável e aceitável pode ser definida de acordo com especificações do sistema de controle como margem de fase, resposta temporal e função de transferência (LIAN et al., 2006). Para o caso da rede de controle CAN, o ponto 1 é determinado pela investigação de características e estatísticas de atrasos de comunicação relacionados com o tráfego de mensagens na rede. Períodos de amostragem mais lentos podem representar menos problemas em relação ao desempenho do sistema de controle, porém a rede apresentará alto nível de ociosidade (capacidade de processamento e troca de informações que não é usada). Para períodos de amostragem mais rápidos, no entanto, a carga de dados trafegando pela rede se torna maior e sua ociosidade diminui, porém a possibilidade de ocorrer mais disputas pelo acesso ao barramento e de um aumento nos atrasos de comunicação pode ser esperado por se tratar de uma rede como o CAN. O ponto 2 demonstra essa situação onde a rede começa a se tornar saturada (sobrecarregada de mensagens), novas mensagens são enviadas para o barramento sobrepondo as anteriores que ainda não tinham sido transmitidas e erros de transmissão tornam-se constantes.

Existem inúmeros parâmetros relacionados ao desempenho de um sistema de comunicação via rede. Muitos deles relacionados à crescente demanda e utilização deste tipo de tecnologia como solução para sistemas com características de tempo real (LIAN et al., 2006). Os parâmetros de desempenho que geralmente são abordados em análises de aplicações de redes CAN estão sendo mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição dos Parâmetros de Desempenho de Redes CAN

Nome	Descrição
Tempo de Transmissão	Tempo entre uma mensagem começar a ser transmitida por um nó de origem e ser recebida pelo nó de destino
Tempo de Resposta Total	Tempo total de leitura ou transmissão de mensagens de todos os dispositivos da rede
Taxa de Utilização	Porcentagem utilizada pela comunicação de dados em relação à capacidade total de uma rede
Número de Mensagens Enviadas e Recebidas	Relação entre o número de mensagens enviadas e recebidas pela rede
Cumprimento de Deadline	Verifica-se o cumprimento do requisito temporal de cada mensagem
Número de Mensagens no Buffer	Monitoramento de número de mensagens nos <i>buffers</i> de recepção e transmissão de cada nó da rede

O requisito temporal de uma mensagem demanda que seu tempo de transmissão tem que ser menor que o seu período de amostragem.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma revisão geral sobre o protocolo CAN e a norma ISO11783 e buscou-se justificar a importância da realização de análise de desempenho de sistemas de controle. Foram sistematizados os principais conceitos de cada assunto de modo a sintetizar os conhecimentos necessários para o acompanhamento do restante do trabalho. É ressaltado o aumento da pesquisa em análise de desempenho de redes de comunicação, dando ênfase ao fato de que a definição dos parâmetros analisados para cada sistema depende

principalmente do método de análise escolhido. Para o caso do protocolo CAN, são resumidos e apresentados os principais parâmetros e dados relacionados com análise de desempenho que vêm sendo pesquisados e utilizados em trabalhos científicos.

4. PROPOSTA DA FERRAMENTA DE ANÁLISE

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são abordadas todas as etapas relacionadas com a proposta da ferramenta de análise de redes CAN. Apresentam-se as justificativas para a escolha da utilização do método de avaliação de desempenho por simulação. A sistematização do modelo matemático de análise de redes CAN é examinada com detalhes através de um estudo temporal da transmissão de mensagens na rede. Para concepção das posteriores simulações, uma metodologia para utilização desse modelo matemático é apresentada.

4.2 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Como apresentado na seção 3.3 do capítulo anterior, a escolha do método de avaliação utilizado para analisar o desempenho de um sistema é uma das principais decisões a serem tomadas e define a proposta deste trabalho. O que mais motivou o aluno na escolha do método de avaliação por simulação foi o fato, descrito na revisão bibliográfica, de que não foram encontrados relatos de desenvolvimentos fundamentados nas equações da abordagem de Tindell, Burns & Wellings (1995) para aplicações agrícolas. Assim, com a sistematização dessas equações em um modelo matemático, obter-se-ia um modelo do sistema de controle via rede CAN que poderia ser utilizado para a realização das simulações.

Outros fatores que justificam esta escolha podem ser citados (SILVA, 2003), como:

- ü A simulação é um método mais simples de ser implementado e que permite a realização de experimentos sob várias condições com o mesmo modelo, fornecendo resultados gerais para o sistema em estudo;
- ü A simulação vem sendo utilizada para redução do tempo de projeto e desenvolvimento e redução de custos relacionados a testes de campo;
- ü A simulação facilita a avaliação de resultados, pois permite a repetição de simulações para o mesmo modelo variando-se apenas os parâmetros desejados e obtendo-se assim informações mais específicas.

4.3 ESTUDO TEMPORAL

As equações da abordagem de Tindell, Burns & Wellings (1995) dão suporte ao desenvolvimento do modelo de análise de redes CAN proposto e utilizado para a realização das simulações. De forma a facilitar o entendimento destas equações, é apresentada uma detalhada análise temporal da transmissão de mensagens em uma rede CAN (GODOY et al., 2006a). Os tempos de transmissão de uma mensagem em uma rede de controle CAN podem ser estudados e calculados através de uma análise do tráfego de mensagens na rede. A Figura 8 mostra um exemplo dos tempos encontrados em uma transmissão de uma mensagem CAN pela rede, desde sua inicialização ou o começo da transmissão por um nó de origem até o término da recepção da mensagem por parte do nó de destino.

Figura 8 – Tempos da Transmissão de uma Mensagem CAN entre Nós (Adaptado de LIAN, MOYNE & TILBURY, 2002)

O tempo total de transmissão de uma mensagem, T_{delay} , pode ser dividido em três partes: atrasos de comunicação no nó de origem, T_{src} , no barramento CAN, T_{bus} , e no nó de destino das mensagens, T_{dest} , como pode ser visto no diagrama detalhado da Figura 9.

Figura 9 - Diagrama Temporal da Transmissão de uma Mensagem CAN (Adaptado de LIAN, MOYNE & TILBURY, 2001)

O atraso do nó de origem, T_{src} , é caracterizado pelo tempo de pré-processamento, T_{pre} , que é a soma do tempo de computação, T_{scomp} , com o tempo de codificação, T_{scode} , realizado no início de cada mensagem. O tempo de espera total, T_{wait} , é caracterizado pela

soma do tempo de espera na fila, T_{queue} , com o tempo de bloqueio, T_{block} . O tempo de espera na fila, T_{queue} , é o tempo que uma mensagem espera no buffer do nó de origem enquanto uma outra mensagem da fila está sendo transmitida. Esse valor depende do tempo de bloqueio das outras mensagens na fila, do período de amostragem das mensagens e da carga de dados a ser processada. O tempo de atraso do barramento CAN, T_{bus} , é caracterizado pela soma do tempo total de transmissão da mensagem, T_{frame} , com o atraso de propagação da rede, T_{prop} . Esse valor depende do tamanho da mensagem, da velocidade de transmissão e do tamanho do barramento CAN. O atraso no nó de destino, T_{dest} , é caracterizado pelo tempo de pós-processamento, T_{post} , que é a soma do tempo de decodificação, T_{dcode} , com o tempo de computação, T_{dcomp} , realizado no final da transmissão de cada mensagem.

A equação (1) apresenta resumidamente o tempo total de atraso numa rede CAN. Os tempos T_{pre} e T_{post} são relacionados com os tempos de processamento e transformação dos dados entre o barramento e o dispositivo que utiliza esses dados. Estes tempos estão totalmente relacionados e dependem das características do software e do hardware utilizados nos nós CAN. Segundo Lian, Moyne & Tilbury (2002), estes valores T_{pre} e T_{post} são tipicamente constantes e pequenos. Por causa desse fato e para não excluí-los dos cálculos, uma hipótese de relação desses valores com o *Jitter* (variabilidade do intervalo de tempo entre mensagens consecutivas serem inseridas e retiradas da fila de mensagens da rede - SANTOS, VASQUEZ & STEMMER, 2004) da rede foi adotada. Wittenmark, Nilsson & Torngren (1995) definem que o *Jitter* de uma rede está fortemente relacionado ao hardware utilizado para implementação do protocolo de comunicação, confirmando tal hipótese.

$$\begin{aligned}
 T_{delay} &= T_{src} - T_{dest} \\
 &= T_{pre} + T_{wait} + T_{bus} + T_{post} \\
 &= T_{pre} + \frac{T_{post}}{J_m} + T_{wait} + \frac{T_{bus}}{C_m}
 \end{aligned} \tag{1}$$

4.4 SISTEMATIZAÇÃO DO MODELO

A escolha do método de avaliação por simulação demanda a sistematização de um modelo de análise do sistema. A definição das equações que compõe este modelo permitirá determinar quais tipos de parâmetros (configuração e desempenho) poderão ser analisados para o sistema, de acordo com o apresentado na seção 3.3.

4.4.1 Tempo de Transmissão – Operação sob Condições Normais

As equações que definem os termos mostrados na equação (1) são definidas para redes de controle baseadas no protocolo CAN e uma relação entre as equações (1) e (2) é apresentada. De acordo com as equações sistematizadas em Godoy, Sousa & Inamasu (2005), o tempo total de transmissão (R_m), no pior caso, de uma mensagem (m) em uma rede CAN (TINDELL, BURNS & WELLINGS, 1995), sob condições normais de operação, é definido pela equação (2).

$$R_m = J_m + W_m + C_m \quad (2)$$

Na equação (2), o termo J_m representa o *Jitter* da mensagem e é determinado empiricamente, utilizando-se J_m igual 0,1 milissegundo (ms). O termo W_m representa o atraso na fila no pior caso (o maior tempo entre a inserção de uma mensagem na fila de prioridades e o início de sua transmissão) e o termo C_m representa o tempo gasto para se transmitir uma mensagem (m) fisicamente sobre o barramento.

O formato do quadro de dados de uma mensagem CAN contém uma largura de *stuff* (quantidade de bits consecutivos que podem ser transmitidos com o mesmo valor 0 ou 1) de 5 bits e uma quantidade O de bits de *overhead* (requerido para verificação de erros e controle de

transmissão) por mensagem. No entanto apenas um número T desta quantidade O de bits de *overhead* está sujeito ao *stuffing* (campos não sujeitos ao bit *stuffing* na Figura 4, seção 3.2.1: Delimiters CRC, ACK e EOF). Assim, para cada um dos termos da equação (2) são definidas as equações (3), (4), (5) e (6), conforme apresentadas em Tindell & Burns (1994) e aperfeiçoadas por Punnekkat, Hansson & Norstrom (2000).

$$C_m = \left(\left\lfloor \frac{T + 8S_m - 1}{4} \right\rfloor + O + 8S_m \right) t_{bit} \quad (3)$$

T = quantidade de bits de *overhead* sujeita ao bit *stuffing*;

O = número máximo de bits de *overhead* por mensagem;

S_m = tamanho limitado da mensagem (m) em bytes (tamanho máximo de 8 bytes);

τ_{bit} = tempo necessário para transmitir um bit sobre o barramento (encontrado de acordo com a velocidade de transmissão de dados: 125K, 250K, 500K, 1M bit/s ou outra qualquer escolhida).

Godoy, Sousa & Inamasu (2005) definem na Tabela 6 os valores das variáveis referentes à equação (3) para os formatos de quadro de mensagem CAN que podem ser analisados.

Tabela 6 – Valor das Variáveis da Equação (2) para os Tipos de Mensagem CAN

Variável nas Equações	Valor da Variável para cada Tipo de Mensagem	
	CAN 2.0 A <i>Standard</i>	CAN 2.0 B <i>Extended</i>
T	34	54
O	47	67

O tempo que uma mensagem CAN (m) fica na fila de espera depende do tempo de bloqueio por mensagens de menor prioridade que estejam ocupando o barramento no

momento (B_m) e do tempo de transmissão das mensagens de maior prioridade. Este tempo é dado pela seguinte equação (4).

$$W_m = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left\lceil \frac{W_m + J_j + t_{bit}}{T_j} \right\rceil \cdot C_j \quad (4)$$

$hp(m)$ = conjunto de mensagens no sistema com prioridade maior que a mensagem (m);

B_m = tempo de bloqueio no pior caso da mensagem (m);

T_j = período de uma mensagem (j);

J_j = *Jitter* de uma mensagem (j).

$$B_m = \max_{\forall k \in lp(m)} (C_k) \quad (5)$$

$lp(m)$ = conjunto de mensagens com prioridade menor que a mensagem (m). (se a mensagem (m) for a de menor prioridade, então B_m é zero).

Os valores C_j e C_k são obtidos para cada mensagem pela equação (3). Para a utilização da equação (4), é necessária uma relação de recorrência, com valor inicial $W_m^0 = 0$ e interações ocorrendo até a convergência dos valores (isto é $W_m^{n+1} = W_m^n$), que resulta na equação (6).

$$W_m^{n+1} = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left\lceil \frac{W_m^n + J_j + t_{bit}}{T_j} \right\rceil \cdot C_j \quad (6)$$

4.4.2 Tempo de Transmissão – Operação sob Condições de Erro

Equações têm sido desenvolvidas e incrementadas ao conjunto de equações anterior, de forma a se analisar a operação da rede CAN sob condições de erro (erros na transmissão da

mensagem e tempos de retransmissão). Nesses novos modelos são incluídas múltiplas fontes de erro e incluídos tempos de inacessibilidade do barramento CAN devido a erros do próprio canal e dos *transceivers* dos dispositivos conectados (PUNNEKATT, HANSSON & NORSTOM, 2000; PINHO, VASQUES & TOVAR, 2000). Assim, para o caso de operação da rede CAN sob condições de erro, o tempo de transmissão (R_m) de uma mensagem (m), passa a ser definido pela equação (7) (GODOY et al. 2006b).

$$R_m = J_m + Q_m + C_m \quad (7)$$

Onde os termos J_m e C_m têm o mesmo significado como apresentado anteriormente, e Q_m corresponde agora ao tempo gasto por uma mensagem na fila de espera, sob condições de erro, dado diretamente pela seguinte formulação de recorrência mostrada pela equação (8), com valor inicial $Q_m^0 = 0$ e interações ocorrendo ate a convergência dos valores ($Q_m^{n+1} = Q_m^n$).

$$Q_m^{n+1} = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left\lceil \frac{Q_m^n + J_j + t_{bit}}{T_j} \right\rceil \cdot C_j + E_m(Q_m + C_m) \quad (8)$$

O termo $E_m(t)$ é uma função de recuperação de erro, que define o valor de bits de *overhead* de erros que podem ocorrer num determinado intervalo de tempo (t), definido pela equação (9). Os valores de $n_{error} = 1$ e $T_{error} = 100$ milisegundos (ms) são definidos de acordo com os valores típicos de taxa de erro do CAN (TINDELL & BURNS, 1994a).

$$E_m(t) = \left(n_{error} + \left\lceil \frac{t}{T_{error}} \right\rceil - 1 \right) (31 \cdot t_{bit} + \max_{\forall K \in hp(m) \cup \{m\}} (C_k)) \quad (9)$$

n_{error} = número de erros em seqüência que podem ocorrer em um intervalo arbitrário;

T_{error} = período de ocorrência do erro.

Em cada erro, o *overhead* de recuperação de erros pode ser aumentado em até 31 bits, seguido pela retransmissão da mensagem. Apenas mensagens de prioridade maior que a mensagem (m) e ela mesma podem ser retransmitidas e atrasar a mensagem (m). A maior destas mensagens é determinada pela equação (10).

$$\max_{\forall K \in hp(m) \cup \{m\}} (C_k) \quad (10)$$

4.4.3 Taxa de Utilização e Otimização

Outro parâmetro muito utilizado para avaliação de desempenho de redes de controle CAN é a taxa de utilização do barramento (valor dado em porcentagem). Para este parâmetro baixos valores significam que existe banda ou capacidade disponível na rede e valores altos significam que a rede está perto da saturação e o desempenho do sistema começa a piorar. A equação (11) define o cálculo desse parâmetro.

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{Ci}{Ti} \times 100 \quad (11)$$

Ci = tempo de transmissão da mensagem (i) no barramento e é dado por (3);

Ti = período de amostragem da mensagem (i) (parâmetro de configuração da rede);

N = número total de mensagens na rede CAN.

Para completar o modelo de análise para rede CAN, foram analisadas equações para cálculo e otimização de sistemas de controle via rede CAN (GODOY et al., 2006a). Metodologias ou equações para otimização de sistemas de controle distribuído têm como objetivo melhorar o controle e o desempenho do sistema para o maior valor possível, mantendo sua estabilidade. Essas metodologias têm sido desenvolvidas e propostas baseadas

na demanda de vários tipos de protocolos e tecnologias de rede juntamente com diferentes soluções existentes para o estudo dos atrasos de comunicação nessas redes (LI & FANG, 2005; YANG, 2006). Os conceitos e definições de uma destas metodologias, chamada *Sampling Time Scheduling* (TIPSUWAN & CHOW, 2003), são pesquisados e aplicados ao estudo de redes baseadas no protocolo CAN no trabalho de Godoy et al., (2006a). Hong (1995) desenvolveu a metodologia *Sampling Time Scheduling (STS)* com a finalidade de selecionar corretamente um período de amostragem para os dispositivos conectados por um NCS de modo que os atrasos de comunicação relacionados à transmissão das mensagens desses dispositivos não afetem o desempenho e a estabilidade do sistema de controle.

A metodologia *STS* pode ser utilizada denominando o número de NCSs conectados por uma rede em um sistema de controle como M . Os períodos de amostragem de todos os M NCSs da rede podem ser calculados a partir do período de amostragem do NCS mais sensível à influência dos atrasos de comunicação da rede, baseado nos valores encontrados a partir da análise de tempo de reposta de rede para o prior caso. O dispositivo mais sensível da rede, denominado NCS_I tem o menor valor de tempo de resposta encontrado, o qual é representado por φ_I . O conceito da metodologia é fundamentado no diagrama de transmissão de dados ilustrado na Figura 10, onde L e σ representam o tempo de transmissão de uma mensagem de dados e seu *overhead*, respectivamente, T_I representa o período de amostragem do NCS_I e r representa o número de mensagens de dados que podem ser transmitidas pela rede no pior caso de operação.

Figura 10 – Diagrama de Transmissão de Dados do Período de Amostragem T_1 da Metodologia de Otimização (TIPSUWAN & CHOW, 2003)

O período de amostragem T_1 pode ser obtido da através da equação (12).

$$T_1 = \frac{j_1 + L}{3} \quad (12)$$

Para se calcular os períodos de amostragem dos outros NCSs conectados na mesma rede de controle, tais dispositivos devem ser indexados pelos tempos de resposta de suas mensagens em ordem ascendente como $NCS_2, NCS_3... NCS_M$. Os períodos de amostragem dos dispositivos $NCS_2, NCS_3... NCS_M$ são determinados a partir de T_1 utilizando-se diferentes regras para as condições de operação da rede. De maneira geral, todos os outros períodos de amostragem podem ser selecionados como aproximadamente valores múltiplos de T_1 como expressado pela equação (13).

$$T_i = k_i T_1, k_i = \wedge \left[\frac{j_i - (T_1 - L)}{2T_1} \right] \rightarrow i = 2, 3...M \quad (13)$$

$a = \wedge(b)$ indica que $a = 2^{v_i}, v_i \in \{0, 1, \dots\}$, onde a é o valor mais próximo que não exceda b .

Com a correta definição dos valores dos períodos de amostragem de todos os dispositivos conectados pela rede de controle, a otimização da utilização da rede (o maior valor possível para a taxa de utilização da rede) pode ser alcançada por essa metodologia, fato que é visto como uma vantagem de aplicação desta metodologia em relação às outras disponíveis na literatura (TIPSUWAN & CHOW, 2003; LI & FANG, 2005; YANG, 2006). A condição para esta otimização é dada pela equação (14).

$$2 \sum_{i=1}^M \frac{T_1}{T_i} \cong r, r = \left\lfloor \frac{T_1 - MS}{L} \right\rfloor \quad (14)$$

O conjunto de equações apresentado, constitui um modelo matemático que pode ser utilizado para análises de redes CAN sob configurações e parâmetros determinados para aplicações em sistemas agrícolas.

4.5 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A partir da definição do modelo de análise, composto pelo conjunto de equações apresentado, determina-se quais os parâmetros (configuração e desempenho) que poderiam ser analisados para um sistema com uma rede de controle CAN. Godoy, Sousa & Inamasu (2005) evidenciam, na Tabela 7, esses tipos de parâmetros que podem ser relacionados com aplicações agrícolas de forma a direcionar a utilização desse modelo ao estudo do desempenho da rede CAN e da influência de parâmetros em diversas situações.

Tabela 7 – Dados Definidos para a Utilização do Modelo Proposto

Dados de Entrada ou Parâmetros de Configuração	Velocidade de Transmissão Barramento
	Formato do Quadro de Dados CAN (CAN 2.0 A / CAN 2.0 B)
	Período de Amostragem das Mensagens dos Equipamentos
	Tamanho (Bytes) do Campo de Dados das Mensagens
	Esquema de Prioridade de Acesso das Mensagens
Dados de Saída ou Parâmetros de Desempenho	Tempo de Transmissão das Mensagens
	Tempo de Resposta do Sistema
	Taxa de Utilização do Barramento / Mensagens
	Dimensionamento e Otimização da Rede
	Cumprimento de Deadline das Mensagens
	Definição do Esquema de Prioridades

Como dito, o estudo e a análise de outros parâmetros, citados nas Tabelas 4 e 5 da seção 3.3, demandariam o desenvolvimento de modelos diferentes do sistema. Um exemplo disso encontra-se no trabalho de Lopes et al. (2005). Neste trabalho é demonstrada, através de um modelo implementado em Redes de Petri, uma análise que relaciona o número de mensagens

enviadas e recebidas e o número de mensagens nos *buffers* de transmissão e recepção (números por dispositivo da rede), com o desempenho de uma rede CAN em aplicações agrícolas. Outros exemplos que apresentam análises de desempenho de redes CAN realizados com outras ferramentas de análise podem ser vistos em Hofstee & Goense (1999), Silva (2003) e Santos, Vasquez e Stemmer (2004).

A partir da definição dos parâmetros de entrada, as equações que definem o modelo são utilizadas para obter os dados de saída apresentados na Tabela 7. Através da análise desses dados de saída pode-se determinar se os parâmetros de entrada conduzem a um bom funcionamento ou desempenho da rede, ou senão, orientar uma nova escolha de entrada de dados. Essa escolha pode ser realizada de acordo com as especificações de uma norma do protocolo (por exemplo: ISO11783). Essa estrutura iterativa origina uma metodologia de análise de redes CAN (Godoy, Sousa & Inamasu, 2005), com um fluxograma de utilização mostrado na Figura 11. Cada ciclo de aplicação deste fluxograma pode ser definido com uma simulação do sistema analisado. Assim, quanto maior a necessidade de resultados e informações a respeito do sistema, maior o número de aplicações da metodologia de análise, isto é, maior o número de simulações do sistema a serem realizadas.

Figura 11 – Fluxograma de Utilização da Metodologia de Análise

Como citado, a metodologia de análise pode ser aplicada para estudo de viabilidade de implementação e do desempenho de redes CAN configuradas sob os parâmetros fixados por normas do protocolo CAN. Para o caso de uma rede CAN sob a norma ISO11783, os dados que seriam levados em consideração seriam o de velocidade de transmissão de 250Kbits/s, versão CAN 2.0 B para tipo de mensagem, definidas pelas Partes 2 e 3 da norma citada.

Devido à complexidade do modelo sistematizado e à possibilidade de realização de várias simulações para análise de parâmetros diferentes, uma implementação computacional do modelo e da metodologia de análise apresentados anteriormente torna-se importante e necessária. Essa implementação é apresentada no próximo capítulo.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as etapas referentes à proposta da ferramenta de análise de desempenho de redes CAN. A sistematização das equações matemáticas que compõe o modelo definiu quais parâmetros (configuração e desempenho) poderão ser analisados para um sistema de controle com rede CAN. O fluxograma proposto para a utilização da metodologia de análise suporta a escolha do uso da simulação e evidencia a necessidade de uma implementação computacional desta metodologia.

5. IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA DE ANÁLISE

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as características e as especificações do programa computacional de simulação de redes CAN desenvolvido nesse trabalho. Esse programa implementa o modelo matemático e a metodologia de análise propostas. Uma validação do programa é realizada através da comparação entre dados obtidos com a aplicação do programa e coletados de uma rede CAN experimental. São avaliadas e descritas novas possibilidades de uso e aplicação para o programa. Uma dessas possibilidades foi a aplicação do programa para auxiliar no projeto e dimensionamento de uma rede CAN de um robô agrícola móvel, citado na introdução, o qual este trabalho deu suporte.

5.2 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

5.2.1 Especificações e Características

A implementação computacional do modelo de equações matemáticas para o protocolo CAN e da metodologia de análise apresentados anteriormente representa uma tarefa necessária de modo a facilitar os trabalhos de análise e obtenção de dados de desempenho e operação da rede CAN com a realização de diversas simulações. Para essa implementação foi utilizado o ambiente de programação LabVIEW 7.0 da *National Instruments* (NI, 2005).

A escolha deste software foi baseada nas seguintes justificativas:

- Disponibilidade do Software (Licença) no laboratório;

- ü Experiência no software por parte do pessoal do laboratório, o que auxilia o aluno no caso de necessidade de suporte;
- ü Possibilidade de desenvolvimento de uma interface visual gráfica e interativa; o que facilita a compreensão e a utilização do programa;
- ü Facilidade oferecida para tarefas de manipulação de grande quantidade de dados, o que seria necessário no desenvolvimento;
- ü Disponibilidade de kits de desenvolvimento (*Toolkits - Report Generation*) relacionados com geração de relatórios de dados de saída,
- ü Possibilidade de integração com rede CAN real (via serial RS232, USB).

Com a ajuda da ferramenta *Application Builder*, disponível no LabVIEW 7.0, foi gerado um arquivo executável (*.exe) composto por um instalador do programa de simulação desenvolvido, de forma que o mesmo pudesse ser instalado e utilizado (“rodado”) em qualquer computador que fosse necessário. Isto facilita a distribuição e a utilização do programa desenvolvido, já que a disponibilidade do software em que foi implementado (LabVIEW) não se torna mais necessária.

O programa computacional desenvolvido é composto basicamente por quatro telas de dados, sendo uma delas com considerações e explicações iniciais sobre o programa, duas telas relacionadas à entrada de dados a ser realizada pelo usuário e uma tela referente à saída de dados que mostra os resultados da simulação. Nas telas de entrada de dados são definidos os dados de entrada (parâmetros de configuração), conforme explicado na Tabela 7 da metodologia de análise, que serão utilizados pelo modelo de equações para gerar os dados de saída (parâmetros de desempenho) relacionados à simulação da rede CAN. Tais dados de saída são obtidos nas tabelas da tela de saída de dados. Essa divisão em telas de dados visa facilitar a visualização e a compreensão dos campos do programa por parte do usuário (Godoy

et al., 2006b). As telas do programa desenvolvido são mostradas nas Figuras 12, 13, 15 e 16. Outras características importantes do programa desenvolvido e muito interessante para aplicações que utilizam grande quantidade de dados de entrada e saída, são funções como:

- Validação dos dados de entrada: função encontrada em cada tela de entrada de dados e que não deixa o usuário continuar a execução do programa se existir dados de entrada incorretos;
- Relatórios dos dados de saída: função para geração das tabelas de saída de dados em planilha eletrônica que auxilia no armazenamento da grande quantidade de dados de saída obtidos nas diversas simulações realizadas com o programa.

5.2.2 Apresentação e Descrição do Funcionamento

Define-se para este capítulo, que o conjunto formado pelo elemento (ou parte da imagem) circundado por um retângulo juntamente com o número X definido para ele será citado no texto como Legenda X da figura. Por exemplo, para se referir a um elemento com retângulo com o número 1, mostrado em uma figura, será citado no texto como o elemento - Legenda 1.

Para apresentar o programa desenvolvido, uma detalhada descrição do seu funcionamento é mostrada a seguir. Para essa demonstração, escolheram-se os seguintes dados para a rede CAN: Formato do quadro de mensagens do protocolo = CAN 2.0B, Número de mensagens = 4 e Velocidade de transmissão de dados = 250Kbits/s.

A utilização do programa é realizada de acordo com os passos:

- 1) Caso o programa não esteja instalado no computador, execute o arquivo “setup.exe” e prossiga com a instalação (Para fazer um *download* do programa, acessar: <http://www.simulacao.eesc.usp.br/~egodoy/mestrado.html>);

- 2) Com o programa instalado, inicia-se sua utilização executando o arquivo “Simulação CAN.exe”. A tela inicial mostrada na Figura 12 exibe a tela de considerações e explicações sobre o programa;

Figura 12 – Tela Inicial do Programa de Simulação de Redes CAN

- 3) Após a leitura dos itens, é necessário clicar no botão “INICIAR” para que a tela de entrada de dados 1 do programa seja habilitada. O botão “LIMPAR DADOS” limpa todos os campos do programa e o botão “INFORMAÇÕES” apresenta informações de contato sobre os responsáveis pelo programa;
- 4) Com a tela de Entrada de Dados 1 habilitada, clica-se na aba correspondente. A Figura 13 mostra tela de Entrada de Dados 1 do programa;
- 5) Na tela Entrada de Dados 1, Figuras 13, são definidas as configurações principais da rede CAN como: Formato do quadro de mensagens do protocolo CAN (CAN 2A, CAN 2B) – Legenda 1, Número de mensagens dos dispositivos da rede – Legenda 2 e Velocidade de transmissão de dados – Legenda 3. No

caso do campo velocidade de transmissão, pode ser selecionado mais de um valor para análise, sendo ele fixo ou definido pelo usuário. Os valores desse campo são definidos de acordo com a rede CAN que se deseja analisar.

Figura 13 – Tela de Entrada de Dados 1 do Programa de Simulação de Rede CAN

- 6) Após a entrada de dados, é necessário clicar no botão “VALIDAR DADOS” – Legenda 4 da Figura 13, para que seja feita uma verificação dos dados de entrada e seja habilitado o botão “CONTINUAR”. Caso exista algum campo de entrada de dados sem preenchimento ou com valor errado, uma mensagem de erro aparece, Figura 14(a). Caso os dados estejam corretos, uma mensagem de OK aparece, Figura 14(b) e o botão “CONTINUAR” é habilitado para o usuário prosseguir;

(a)

(b)

Figura 14 – Mensagens Possíveis Relacionadas à Parte de Validação de Dados

- 7) Com a tela de Entrada de Dados 2 habilitada, clica-se na aba correspondente. A Figura 15 mostra a tela de Entrada de Dados 2 do programa;

Número	Descrição	Quantidade Bits	Prioridade	Período / Deadline (ms)
1	Nó CAN B do Experimento de Validação	16	1	50
2	Nó CAN C do Experimento de Validação	32	4	50
3	Nó CAN D do Experimento de Validação	48	3	50
4	Nó CAN E do Experimento de Validação	64	2	50

Figura 15 – Tela de Entrada de Dados 2 do Programa de Simulação de Rede CAN

- 8) Na tela Entrada de Dados 2, Figura 15, de acordo com o número de mensagens selecionado anteriormente, são definidos os campos que descrevem o conjunto de mensagens da rede. Para cada mensagem são requeridos os seguintes dados: descrição da função, quantidade de bits de dados (*Data field* – campo de dados), prioridade e o período de amostragem (T) em milisegundos (ms) – Legenda 1;
- 9) Após a entrada de dados, é necessário clicar no botão “VALIDAR DADOS” – Legenda 2 da Figura 15, repetindo-se o passo 6;
- 10) Com a tela Saída de Dados habilitada, clica-se na aba correspondente. A Figura 16 mostra tela de Saída de Dados do programa;
- 11) Na tela Saída de Dados, Figura 16, são mostrados os resultados obtidos para a simulação da rede CAN. Resultados como o tempo de transmissão das mensagens para operação da rede sob condições normais (*Rm*) e condições de erro (*Rm Erro*) e tempo de resposta total são mostrados – Legenda 3. Também

são mostrados os dados sobre taxa de utilização e valor de otimização – Legenda

2.

Escolha o Nome / Local para Salvar Arquivo de Dados

C:\Simulador CAN\sim1

Salvar Finalizar

Info_Utilização

Resultados para Simulação do Barramento:

Número de Mensagens - 4

Mensagem: Versão CAN 2.0 B - ID 29 bits

Velocidade Transmissão do Barramento 250KBit/s

Taxa de Utilização de Mensagens 1,28%

Taxa de Utilização do Barramento 4,16%

Valor para Otimização da Taxa de Utilização do Barramento 16,99

Saída de Dados

	Número	Descrição	Quantidade de Bits	Prioridade	Período \ Deadline (ms)	Rm (ms) 250KBit/s	Rm Erro (ms) 250KBit/s
1	1	CAN B do Experimento de Validaç	16	1	50	1,14	1,66
2	4	CAN E do Experimento de Validaç	64	2	50	1,70	2,46
3	3	CAN D do Experimento de Validaç	48	3	50	2,18	2,94
4	2	CAN C do Experimento de Validaç	32	4	50	2,18	2,94
	T	Tempo Total	-	-	-	7,20	10,02

Figura 16 – Tela de Saída de Dados do Programa de Simulação de Rede CAN

Desses dados, tem-se que a taxa utilização de mensagens é calculada utilizando o número de bits (bytes) de dados em uma mensagem CAN e a taxa de utilização do barramento é calculado utilizando o número total de bits (*bytes*) em uma mensagem CAN incluindo bits de *overhead*. O dado sobre valor para otimização da taxa de utilização do barramento corresponde ao valor pelo qual se podem dividir todos os períodos de amostragem das mensagens para otimizar e atingir a taxa de utilização máxima do barramento com o cumprimento dos requisitos temporais das mensagens. Tais requisitos demandam que o tempo de transmissão de uma mensagem tem que ser menor que o seu período de amostragem. Quando o requisito temporal de uma ou mais mensagens não é cumprido, um asterisco (*) aparece ao lado do tempo de transmissão e conseqüentemente o valor de otimização dessa análise não pode ser calculado (sinalizado por --).

Todos os resultados são obtidos de acordo com a velocidade de transmissão escolhida. Caso fosse escolhida mais de uma velocidade de transmissão para análise, novos campos apareceriam nas tabelas de saída de dados, Figura 16.

- 12) Para armazenamento dos resultados da simulação, primeiramente o usuário escolhe o nome e o caminho onde irá salvar os dados (Pasta C:/simulador CAN – padrão). Feito isso, é necessário clicar no botão “OK” para habilitar o botão “Salvar” – Legenda 1 da Figura 16. Clicando no botão “Salvar” é automaticamente gerado um relatório em planilha eletrônica contendo os dados da simulação e salvo o arquivo conforme especificado. O botão “FINALIZAR” encerra a utilização do programa;
- 13) No relatório gerado podem ser visualizadas duas planilhas, sendo uma sobre as informações de taxas de utilização e otimização, Figura 17, e a outra com os resultados dos tempos de transmissão das mensagens da rede CAN, Figura 18.

	A	B
1	Resultados para Simulação do Barramento:	
2		
3	Número de Mensagens - 4	
4	Mensagem: Versão CAN 2.0 B - ID 29 bits	
5		
6	Velocidade Transmissão do Barramento	250KBit/s
7	Taxa de Utilização de Mensagens	1,28%
8	Taxa de Utilização do Barramento	4,16%
9	Valor para Otimização da Taxa de Utilização do Barramento	16,99
10		

Info_Utilização / Saída de Dados /

Figura 17 – Planilha Eletrônica “Info Utilização” do Relatório de Resultados Gerados

Microsoft Excel - Sim1								
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Número	Descrição	Quantidade de Bits	Prioridade	Período \ Deadline (ms)	Rm (ms) 250KBit/s	Rm Erro (ms) 250KBit/s
2	1	1	Nó CAN B do Experimento de Validação	16	1	50	1,14	1,66
3	2	4	Nó CAN E do Experimento de Validação	64	2	50	1,7	2,46
4	3	3	Nó CAN D do Experimento de Validação	48	3	50	2,18	2,94
5	4	2	Nó CAN C do Experimento de Validação	32	4	50	2,18	2,94
6		T	Tempo Total	-	-	-	7,2	10,02
7								

Figura 18 – Planilha Eletrônica “Saída de Dados” do Relatório de Resultados Gerados

5.3 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

Para comprovar e validar o desenvolvimento do programa de simulação que implementa a metodologia de análise e o modelo de equações apresentados, é realizado um experimento que consiste na comparação entre resultados da análise dos dados obtidos com o programa de simulação com os dados coletados de uma rede CAN experimental (real) montada no laboratório.

5.3.1 Montagem da Rede CAN Experimental

Como definido, uma rede CAN é composta pelo conjunto de dispositivos conectados (sensores e atuadores), interfaces de integração (nós CAN ou ECU) e barramento. SOUSA (2002) apresenta um levantamento de componentes e circuitos eletrônicos para desenvolvimento de redes CAN, sendo sugerida uma interface padrão para integração destes dispositivos, que foi posteriormente adaptada e aperfeiçoada em BRAZ et al. (2004). A rede CAN deste experimento foi montada utilizando-se desta interface. O esquemático do circuito desta interface CAN implementada, mostrado na Figura 19, é composto basicamente por três módulos integrados, que são:

- ü Transceptor CAN: módulo responsável pela adaptação dos níveis de tensão entre circuito do nó CAN e do barramento CAN;
- ü Transceptor RS232: módulo responsável pela adaptação dos níveis de tensão entre circuito do nó CAN e a interface RS232, baseada em um controlador tipo USART (*Universal Synchronous / Asynchronous Receiver Transmitter*);
- ü Microcontrolador com Controlador CAN: módulo constituído por CPU, memória, programas computacionais, interfaces para outros dispositivos e controlador CAN, que é o módulo central da implementação e do controle do protocolo utilizado para comunicação.

Figura 19 – Esquemático do Circuito da Interface CAN Padrão (BRAZ et. al. 2004)

Entre as especificações e características dessa interface, mostradas de acordo com as legendas da imagem da interface da Figura 20, podem-se citar:

- ü Microcontrolador PIC18F258 (MICROCHIP, 2006a) com controlador CAN – Legenda 4;
- ü Transceiver MCP2551 (MICROCHIP, 2006) da Microchip – 2;

- ü Circuito integrado de condicionamento da porta serial MAX232 (MAXIM, 2006) – Legenda 3;
- ü Barramento CAN a 4 fios (GND, VCC, CAN_H, CAN_L) – Legenda 6;
- ü Conexão de dispositivos através de interface Serial RS232 – Legenda 1;
- ü Conexão de sensores e atuadores através de portas de E/S (entrada e saída) – Legenda 5;
- ü Conexão de outros dispositivos através de interfaces SPI (*Serial Peripheral Interface.*), I²C (*Inter-integrated Circuit*) (MICROCHIP, 2006a);
- ü Controle de dispositivos através de portas PWM (*Pulse With Modulation*), A/D (conversores analógico – digital), (MICROCHIP, 2006a).

Figura 20 - Imagem da Interface CAN Implementada (Sousa, 2002)

Para a realização deste experimento dividiu-se o desenvolvimento de programas e rotinas de controle em duas partes, como mostrado na Figura 21. A primeira relacionada com a IHM - interface homem-máquina, que seria responsável pela troca de informações e dados entre a rede CAN e o aluno, e uma segunda relacionada com o hardware e com as rotinas de

controle de envio e recepção de mensagens das ECU que formariam a rede CAN a ser analisada.

Para o programa da IHM foi utilizado o ambiente de programação LabVIEW 7.0. Este programa é executado em um *notebook* conectado a uma ECU via interface serial RS232. Para as rotinas de controle das ECU's utilizou-se o programa MPLAB 7.30 com Compilador C18 da Microchip, que possibilita o desenvolvimento dos programas em Linguagem C para posterior transformação para ASSEMBLY, requerido para gravação nos microcontroladores. Para essa gravação utilizou-se de um gravador PICSTART Plus da Microchip.

Figura 21 – Esquema de Desenvolvimento de Programas e Rotinas para o Experimento

Assim, definiu-se que a rede CAN utilizada neste experimento seria composta por 5 nós CAN (ECU), de acordo com a Figura 22, e implementaria comunicação de acordo com a norma ISO11783. Dessas 5 ECU's, somente 4 ECU's (B, C, D, E) representariam a rede CAN a ser analisada (hardware da rede) e 1 ECU (A), conectada a um *notebook*, seria somente responsável pela troca de informações entre a rede CAN e o aluno (IHM), não influenciando na análise da rede CAN proposta.

Figura 22 – Bancada de Montagem da Rede CAN para o Experimento de Validação

O primeiro trabalho foi implementar a comunicação PC β à ECU (A). Para isso, definiu-se um protocolo assíncrono de transmissão dos dados recebidos do barramento CAN pela ECU (A), no formato da mensagem da ISO11783, os quais eram transformados numa *string* de dados e enviados para o PC via interface serial RS232. O processo inverso também poderia ocorrer, com o PC enviando uma *string* de dados que era transformada numa mensagem ISO11783. Para diferenciar as *strings* do protocolo, apresentado na Figura 23, no início de cada *string* de dados foi inserido uma interrogação (?) e entre os campos da mensagem foi inserido uma vírgula (,).

Figura 23 – Protocolo Proposto para Comunicação entre ECU e PC

Este protocolo foi implementado juntamente com a rotina de controle da ECU (A). A ECU (A) é responsável pela aquisição, medição e transmissão dos dados da rede para o aluno (programa LabVIEW) e também por enviar dois tipos de mensagem (PEDIDO e ECO) para

as outras ECU's (B, C, D, E) da rede, quando solicitado pelo aluno. O significado e a função desses dois tipos de mensagem são apresentados a seguir.

Em seguida desenvolveram-se as rotinas de controle das quatro ECU's (B, C, D, E) que formariam a rede CAN a ser analisada. Essas ECU receberiam da ECU (A) um pedido de envio de mensagem (mensagem PEDIDO), sinalizando o início do processo de medição e coleta de dados da rede CAN. A partir deste momento, cada uma das quatro ECU passaria a enviar uma mensagem no formato ISO11783, de acordo com parâmetros configurados pelo aluno (Quantidade de dados – *Data Field*, Período de Amostragem e Prioridade), durante um período de tempo (t) maior ou igual ($\geq$) a trinta vezes o maior período de amostragem das mensagens da rede CAN analisada. Este valor do tempo “ t ” é definido de acordo com regras da estatística para delineamento e coleta de dados em experimentos de simulação e define um número mínimo $n = 30$ de coleta de um mesmo dado.

Para o programa do LabVIEW, da parte de IHM, definiu-se a realização de duas funções: receber os dados da rede CAN analisada, via ECU (A), fazer o tratamento adequado (calcular estatísticas Média e Desvio Padrão dos dados) e armazená-los para uso posterior e também enviar a mensagem de PEDIDO e a mensagem de ECO para a ECU (A), que repassaria a mensagem para as outras ECU's da rede, quando fosse requerido pelo aluno. A mensagem de ECO é uma mensagem definida para gerenciamento da rede. Ao receber uma mensagem de ECO, qualquer ECU conectada na rede envia de volta, para a ECU (A), uma outra mensagem específica reportando seu funcionamento.

Para a comunicação e tráfego de mensagens entre as ECU's da rede, foram definidos os valores dos campos das mensagens, mostrados na Tabela 8, de acordo com a norma ISO11783 de forma a facilitar o controle e gerenciamento da rede CAN analisada. Como definido por essa norma, o valor do campo *Data Page* é sempre 0 (valor é reservado implementações futuras da ISO11783). Foi definido o uso do valor 6 (*default priority* de

acordo com a ISO11783) para o campo *Priority* e o uso do valor 255 (proprietário reservado para desenvolvimento específico de projetistas de acordo com a ISO11783) para o campo *PDU Format*. Esses três valores serão utilizados para todas as mensagens da rede. A definição deste valor 255 determina que todas as mensagens serão do tipo PDU2 (ver seção 3.2.2). Outra definição foi feita em relação aos endereços de origem (SA - *Source Address*) e números de identidade (IN - *Identity Number*) das ECU's, escolhendo-se os seguintes valores: ECU (A) – SA=128 IN=50, ECU (B) – SA=129 IN=51, ECU (C) – SA=130 IN=52, ECU (D) – SA=131 IN=53 e ECU (E) – SA=132 IN=54.

Tabela 8 – Definição das Mensagens de Acordo com a ISO11783 para a rede CAN Analisada

Mensagem	Função	PRI	DP	PDU	GE	SA	DL	D[0]	D[1]	...D[7]
ECO	Gerenciamento e Inicialização	6	0	255	10	128	2	255	0	--
PEDIDO	Pedido de Envio das Mensagens de Dados	6	0	255	5	128	2	X	1	--
DADOS	Mensagens enviadas para realização do experimento	6	0	255	1	X	X	X	X	X
RETORNO ECO	Mensagem de resposta das ECU's ao ECO	6	0	255	10	X	2	255	1	--

Os valores marcados com "--" são campos que não são utilizados. Os valores marcados com "X" na Tabela 8 são determinados de acordo com os dados da ECU e da mensagem. Para o campo SA (*Source Address*), os valores de X são determinados de acordo com qual ECU enviou a mensagem. Os campos DL (*Data Length*) e D[0] a D[7] (8 bytes do campo *Data Field*) são determinados de acordo com a quantidade de bytes de dados que a mensagem irá transmitir. O valor do campo DL determina a quantidade de campos D[]. Por exemplo, para DL = 1 tem-se um campo D[] (D[0]), para DL = 2 tem-se dois campos D[] (D[0], D[1]) e assim por diante até o valor máximo de DL = 8 (D[0], D[1], ...D[7]). Para o campo D[0], campo de endereçamento das mensagens, os valores de X determinam para qual (ou todas) ECU se deseja enviar a mensagem. Isso é explicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores Definidos para Endereçamento das Mensagens

Valor para Campo D[0]	Tipo de Endereçamento	Qual ECU Recebe
255	Global	Todas as conectadas
1	Específico	ECU (A)
2	Específico	ECU (B)
3	Específico	ECU (C)
4	Específico	ECU (D)
5	Específico	ECU (E)

Todo esse desenvolvimento das mensagens de acordo com a ISO11783 facilita trabalhos futuros de controle e monitoramento da rede CAN. Assim, consegue-se transmitir dados especificamente para uma ECU ou de forma global (onde todas as ECU recebem a mesma mensagem) e consegue-se identificar (de qual ECU) as mensagens que são recebidas.

5.3.2 Dados da Aplicação do Programa

Os primeiros resultados analisados para o experimento de validação foram obtidos com o programa de simulação desenvolvido. Para a utilização desse programa, foram selecionados para a rede CAN os seguintes dados de entrada: formato do quadro de mensagens = CAN 2.0B, número de mensagens = 4 e velocidade de transmissão = 400Kbits/s e um conjunto de mensagens de acordo com a Tabela 10. O valor da velocidade de transmissão de 400 kbits/s foi definido, ao invés do valor de 250Kbits/s determinado pela ISO11783, devido a um erro de configuração dos tempos de bit do protocolo CAN no microcontrolador utilizado. Para que não houvesse necessidade de uma nova coleta de dados da rede experimental, e de modo a facilitar o trabalho, foi utilizado o mesmo valor para o programa de simulação.

Tabela 10 – Caracterização do Conjunto de Mensagens da Rede CAN do Experimento de Validação

Nº	Descrição da Mensagem	Quantidade de dados (Bits)	Prioridade	Período (ms)
1	Nó CAN B do Experimento de Validação	16	1	50
2	Nó CAN C do Experimento de Validação	32	4	50
3	Nó CAN D do Experimento de Validação	48	3	50
4	Nó CAN E do Experimento de Validação	64	2	50

A aplicação do programa, para a rede CAN proposta neste experimento, é semelhante ao que pode ser visto nas Figuras 13, 15 e 16 da seção 5.2.2, a qual descreve e explica detalhadamente o funcionamento do programa. Assim, obtiveram-se os resultados mostrados na Tabela 11 para a primeira simulação realizada com o programa.

Tabela 11 – Resultados Obtidos com a Aplicação do Programa de Simulação para a Rede CAN do Experimento
– Simulação 1

Conjunto de Mensagens				Tempo de Transmissão das Mensagens na Rede CAN	
Mensagem	Quantidade de Dados (Bits)	Prioridade	Período (ms)	Rm (ms)	Rm Erro (ms)
Nó CAN B	16	1	50	0,75	1,08
Nó CAN E	64	2	50	1,10	1,58
Nó CAN D	48	3	50	1,40	1,88
Nó CAN C	32	4	50	1,40	1,88
Taxa de Utilização da Rede	2,60 %	Tempo de Resposta		4,65	6,41

Para aumentar a quantidade de dados obtidos são propostas outras simulações da rede CAN do experimento. A Tabela 12 especifica os parâmetros alterados em relação ao conjunto de mensagens (original) da rede do experimento, da Tabela 10, para cada simulação realizada.

Tabela 12 – Parâmetros Alterados do Conjunto de Mensagens da Rede CAN do Experimento

Simulação	Parâmetros Alterados
S1	Conjunto de Mensagens Original (Tabela 10)
S2	Dados (bits) de todas as mensagens = 64
S3	Prioridade das Mensagens (de [1,4,3,2] para [4,2,1,3])
S4	Período de Amostragem das Mensagens (de 50ms para 100ms)

Através dos resultados obtidos com as simulações propostas, traçaram-se gráficos referentes aos parâmetros tempo de resposta e taxa de utilização da rede. Estes gráficos, mostrados na Figura 24, apresentam o comportamento de operação da rede CAN do experimento para o levantamento realizado com os dados obtidos pelo programa de simulação desenvolvido.

Figura 24 – Comportamento de Operação da Rede CAN com Dados do Programa de Simulação

(a) Taxa de Utilização da Rede, (b) Tempo de Resposta das Mensagens sob Condições de Erro

As simulações e os parâmetros alterados nas análises foram propostos levando-se em consideração a disponibilidade de hardware para o experimento (ECU's) e a obtenção de dados que também pudessem ser obtidos através da rede CAN montada no laboratório, facilitando os trabalhos de programação de rotinas e montagem da rede experimental.

5.3.3 Dados da Rede CAN Experimental

Nesta parte do trabalho foram realizados diversos experimentos com a rede CAN experimental montada no laboratório, para coleta dos mesmos dados obtidos com a aplicação do programa de simulação desenvolvido. Para entender o funcionamento do processo de aquisição dos dados da rede CAN montada, mostrada anteriormente na Figura 22, alguns procedimentos foram definidos e precisam ser descritos. Essas definições foram adotadas para que a operação da rede CAN experimental fosse o mais próximo possível da situação simulada pelo programa desenvolvido. Assim, os dados coletados da rede experimental estariam o melhor possível de acordo com os dados obtidos com as simulações do programa, validando portanto a metodologia e o modelo matemático de análise propostos.

Para a medição dos dados requeridos (tempo de transmissão das mensagens na rede CAN), definiu-se a utilização de um *TIMER* de 16 bits (65536 unidades de medida disponíveis) do PIC18F258, configurado para contador de tempo com um *prescaler* de 1:8 (1 unidade de medida = 8 ciclos do microcontrolador). Para o caso da interface CAN com um PIC18F258 com cristal de 40 MHz, cada ciclo equivaleria a 100 nanossegundos (ns), originando uma unidade de medida para o contador de 0,8 microssegundos (ms). O processo de medição e coleta de dados é realizado de acordo com o fluxograma da Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma do Processo de Medição e Coleta de Dados da Rede CAN Experimental

Neste processo de medição e coleta de dados é importante realçar que o início da contagem do tempo para a transmissão das mensagens acontece depois que a ECU (A) retransmite a mensagem de PEDIDO para as outras ECU's da rede. Esse fato foi definido para incorporar o tempo de bloqueio (termo B_m das equações do modelo, vide seção 4.4.1) à operação da rede experimental. Iniciada a contagem dos tempos de transmissão, as outras ECU's da rede recebiam a mensagem de pedido e respondiam, todas ao mesmo tempo e proporcionando a disputa pelo acesso ao barramento, enviando cada uma delas sua mensagem de DADOS. A ECU (A), configurada para receber todas as mensagens da rede, ao receber essas mensagens (DADOS), verificava seu endereço de origem (*Source Address*) e armazenava o valor do contador de tempo para cada ECU separadamente. Assim conseguia-se calcular o tempo de transmissão das mensagens para a rede CAN analisada, formada pelas ECU's (B), (C), (D) e (E). O desenvolvimento desta parte da rotina responsável pela medição e armazenamento dos tempos de transmissão apresentou grande dificuldade, explicado pelo fato de o tempo entre o recebimento das mensagens (DADOS) das ECU's, pela ECU (A), ser muito pequeno. Esse tempo muito pequeno impunha que a rotina de medição e armazenamento fosse a mais otimizada possível e tivesse um tempo de ciclo menor que o menor desses tempos entre o recebimento das mensagens, para que a medição fosse feita corretamente.

De acordo com o conjunto definido para a rede CAN do experimento de validação, mostrado na Tabela 10 anteriormente, realizou-se a coleta dos dados da rede experimental. Os resultados obtidos para o primeiro experimento, equivalente a Simulação 1, são mostrados na Tabela 13. É importante citar que os dados dos tempos de transmissão das mensagens e do tempo de resposta foram calculados de acordo com os requisitos do tratamento estatístico (Média e Desvio Padrão) realizado para os dados coletados (Teorema do Limite Central - $n = 30$ número de vezes que cada dado foi coletado) em cada experimento.

Tabela 13 – Resultados Coletados da Rede CAN Montada para o Experimento – Simulação 1

Conjunto de Mensagens				Tempo de Transmissão das Mensagens da Rede CAN	
Mensagem	Quantidade de Dados (Bits)	Prioridade	Período (ms)	Rm (ms) - Média	Desvio Padrão (ms)
Nó CAN B	16	1	50	0,904	0,0023
Nó CAN E	64	2	50	1,449	0,0024
Nó CAN D	48	3	50	1,931	0,0018
Nó CAN C	32	4	50	2,351	0,0014
Taxa de Utilização da Rede	3,611 %	Tempo de Resposta		6,635	

Uma ressalva importante precisa ser explicada neste ponto do trabalho. Para o cálculo do valor da taxa de utilização do barramento foram utilizados os valores totais dos tempos de transmissão das mensagens ($R_m = J_m + Q_m + C_m$), devido à impossibilidade de se calcular separadamente cada um desses parâmetros para a rede CAN experimental. Como explicado no item 4.4 que apresenta as equações sistematizadas, o correto seria utilizar somente o tempo de transmissão da mensagem fisicamente no barramento (C_m) para este cálculo. Assim, espera-se que os valores da taxa de utilização do barramento obtidos com a rede CAN experimental sejam pouco maiores que os valores obtidos com o programa de simulação.

Os baixos valores encontrados para o Desvio Padrão, que podem ser vistos na Tabela 13, demonstram que os dados coletados não apresentam variabilidade de valores muita alta, isto é, a maioria dos 30 dados coletados apresenta pouca diferença em relação ao valor da média calculado. Para aumentar a quantidade de dados coletados foram realizados novos experimentos com a rede CAN montada no laboratório. Esses novos experimentos foram realizados de acordo com os parâmetros da Tabela 12 mostrada na seção anterior, que especifica os parâmetros alterados em cada experimento. Através dos resultados coletados nos experimentos propostos, traçaram-se gráficos referentes aos parâmetros tempo de resposta e taxa de utilização da rede, de acordo com o que foi realizado para os dados obtidos com o programa desenvolvido. Estes gráficos, mostrados na Figuras 26(a) e (b), apresentam o comportamento de operação da rede para os dados coletados da rede CAN experimental.

Figura 26 – Comportamento de Operação da Rede CAN com Dados Experimentais

(a) Gráfico Taxa de Utilização da Rede, (b) Gráfico Tempo de Resposta das Mensagens

5.3.4 Comparação dos Resultados

Com a realização de todo o processo de aquisição de dados da rede CAN proposta para esse experimento de validação, realizou-se a análise e comparação final desses dados. Essa tarefa foi realizada para validação e comprovação do correto desenvolvimento do programa de simulação que implementa a metodologia de análise e o modelo de equações matemáticas sistematizados para redes CAN. A Tabela 14 sintetiza uma comparação entre os resultados obtidos por ambos os métodos (aplicação do programa de simulação e coletados da rede experimental) para a Simulação 1 proposta e realizada nesse experimento.

Tabela 14– Comparação dos Resultados Obtidos para Rede CAN do Experimento de Validação – Simulação 1

Conjunto de Mensagens				Tempo de Transmissão das Mensagens da Rede CAN	
Mensagem	Quantidade de Dados (Bits)	Prioridade	Período (ms)	Dados do Programa de Simulação	Dados da Rede Experimental
Nó CAN B	16	1	50	1,08	0,904
Nó CAN E	64	2	50	1,58	1,449
Nó CAN D	48	3	50	1,88	1,931
Nó CAN C	32	4	50	1,88	2,351
Tempo de Resposta (ms)				6,41	6,635
Taxa de Utilização do Barramento (%)				2,6	3,61

Analisando-se os dados da Tabela 14 verifica-se uma pequena diferença entre os dados obtidos pelos dois métodos para o parâmetro tempo de resposta, o que pode ser explicado pelo fato de o modelo de equações sistematizado considerar o pior caso para a operação da rede CAN. Assim, como a operação da rede CAN experimental nem sempre ocorre de acordo com a situação de pior caso, era esperado uma pequena diferença entre os valores obtidos com os dois métodos. Já para o parâmetro taxa de utilização do barramento, essa diferença um pouco maior entre os valores pode ser explicada, além do citado anteriormente, pela ressalva descrita no item 5.3.3. Os gráficos mostrados nas Figuras 27 e 28 apresentam um resumo dos resultados obtidos para as outras simulações de operação propostas. A idéia de utilização para estes gráficos foi comparar os resultados e comportamentos de operação da rede CAN levantados por ambos os métodos de obtenção de dados, verificando suas semelhanças e assim comprovando e validando todo o desenvolvimento realizado.

Figura 27 – Comparação dos Resultados Obtidos para o Parâmetro Tempo de Resposta para as Simulações de Operação da Rede CAN

A Figura 27 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos nas simulações para o parâmetro tempo de resposta. Verifica-se de acordo com a Figura 27 que os dados encontrados por ambos os métodos possuem valores muito próximos e as curvas são muito

semelhantes para as situações propostas nas simulações. Tais resultados comprovam o correto desenvolvimento e validam a utilização do programa implementado.

A Figura 28 representa uma síntese dos resultados obtidos nas simulações para o parâmetro taxa de utilização da rede. Verifica-se de acordo com a Figura 28(a) que os dados encontrados por ambos os métodos possuem valores próximos para as situações propostas nas simulações. Na Figura 28(b) é feita uma sobreposição dos comportamentos de operação da rede para ambos os métodos, mostrando que apesar das diferenças encontradas entre os valores obtidos, devido aos fatos já explicados, as curvas dos comportamentos de operação da rede CAN analisada são praticamente as mesmas para os dois métodos de obtenção de dados. De maneira similar aos resultados verificados anteriormente, esses fatos comprovam o correto desenvolvimento e validam a utilização do programa implementado.

Figura 28 – Síntese dos Resultados Obtidos para o Parâmetro Taxa de Utilização do Barramento para as Simulações de Operação da Rede CAN: (a) Comparação dos Resultados, (b) Sobreposição dos Comportamentos

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que se obteve sucesso nesse processo de validação do programa de simulação de redes CAN desenvolvido. Outro fato comprovado foi a possibilidade de utilização deste programa como uma ferramenta de simulação e análise de desempenho, diante da grande quantidade de dados que podem ser

calculados corretamente com a utilização deste programa e que podem ser relacionados ao desempenho e operação da rede CAN analisada.

5.4 PROPOSTAS DE ANÁLISE E UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

Para demonstrar o potencial e a flexibilidade de utilização do programa de simulação e análise de desempenho de redes CAN desenvolvido, são apresentadas e propostas algumas possibilidades de uso e aplicação do mesmo. Entre essas possibilidades, pode-se citar a utilização do programa de simulação para realização dos seguintes tipos de análise em uma aplicação:

- ü Análise da influência de parâmetros de configuração no desempenho da rede CAN, como realizado em GODOY et al. (2006c);
- ü Análise da viabilidade de aplicação de uma rede CAN como sistema de controle distribuído, como realizado em GODOY et al. (2006b);
- ü Análise e simulação da operação da rede CAN sob configurações específicas (por exemplo: configurações definidas por um conjunto de mensagens referente aos equipamentos utilizados em uma aplicação ou especificações determinadas por uma norma como a ISO11783), como realizado em GODOY et al. (2006);
- ü Análise e otimização de um sistema de controle baseado numa rede CAN, como realizado em GODOY et al. (2006a);
- ü Análise para auxiliar no projeto e dimensionamento dos parâmetros de uma rede CAN, como realizado em GODOY et al. (2006c);

Algumas dessas propostas de análise são apresentadas na próxima seção e dizem respeito à aplicação de uma rede CAN como rede de comunicação embarcada para integração de diversos equipamentos como sensores, GPS, bússola digital, motores e controladoras em um robô agrícola móvel.

5.4.1 Análise para o Robô Agrícola Móvel

Como citado na introdução, o presente trabalho ofereceu suporte ao desenvolvimento de um projeto FAPESP (Veículo Agrícola Autônomo (VAA): uma plataforma para desenvolvimento de tecnologias de navegação autônoma e para aquisição de dados em Agricultura de Precisão, processo FAPESP 03/06582-0; PORTO, 2003) que envolveu a montagem e análise de uma rede CAN embarcada num robô agrícola móvel (RAM).

O programa desenvolvido foi utilizado para obter dados relacionados à simulação de operação da rede CAN para um determinado conjunto de mensagens referente aos equipamentos que seriam conectados na estrutura do robô, conforme mostrado na Figura 29. Estes dados obtidos contribuíram para o dimensionamento de parâmetros e conhecimento da utilização da rede CAN projetada e da influência dos parâmetros de configuração no desempenho do sistema de controle, de acordo com GODOY et. al (2006c) e também para a otimização de sua operação, de acordo com GODOY et. al (2006).

Figura 29 – Estrutura do Robô Agrícola Móvel e Equipamentos Conectados pela Rede CAN

Para a utilização da metodologia de análise e do programa computacional de simulação de redes CAN desenvolvido foram consideradas simulações com parâmetros de entrada diferenciados para o robô agrícola móvel apresentado. Para isso, foi proposto um conjunto de mensagens e parâmetros preliminares descritos na Tabela 15 referentes aos dispositivos ilustrados na Figura 29.

As colunas P1, P2 e P3 da Tabela 15 correspondem a três esquemas de prioridades de acesso ao barramento CAN para as mensagens propostas para os dispositivos do robô agrícola.

Tabela 15 – Caracterização do Conjunto de Mensagens da Rede CAN do Robô Agrícola

Nº	Descrição das Mensagens	P1	P2	P3	Dados (bits)	Período T (ms)
1	Controle do Motor de Propulsão 1	5	1	1	16	50
2	Controle do Motor de Propulsão 2	6	2	2	16	50
3	Controle do Motor de Propulsão 3	7	3	3	16	50
4	Controle do Motor de Propulsão 4	8	4	4	16	50
5	Controle do Motor de Guiagem 1	9	5	9	16	50
6	Controle do Motor de Guiagem 2	10	6	10	16	50
7	Controle do Motor de Guiagem 3	11	7	11	16	50
8	Controle do Motor de Guiagem 4	12	8	12	16	50
9	Velocidade / <i>Encoder</i> do Motor de Propulsão 1	13	9	5	16	100
10	Velocidade / <i>Encoder</i> do Motor de Propulsão 2	14	10	6	16	100
11	Velocidade / <i>Encoder</i> do Motor de Propulsão 3	15	11	7	16	100
12	Velocidade / <i>Encoder</i> do Motor de Propulsão 4	16	12	8	16	100
13	Deslocamento Angular do Motor de Guiagem 1	17	13	13	16	100
14	Deslocamento Angular do Motor de Guiagem 2	18	14	14	16	100
15	Deslocamento Angular do Motor de Guiagem 3	19	15	15	16	100
16	Deslocamento Angular do Motor de Guiagem 4	20	16	16	16	100
17	Conjunto de Sensores Ultra-som Lado Direito	21	17	21	64	300
18	Conjunto de Sensores Ultra-som Lado Esquerdo	22	18	22	64	300
19	Posicionamento GPS	23	19	19	32	500
20	Localização Bússola Digital	24	20	20	32	250
21	Dados Processados da Câmera de Navegação	25	21	17	32	1000
22	Controle do PC Industrial Embarcado	1	22	18	64	1000
23	Monitoração e Gerenciamento	2	23	23	64	1000
24	Monitoração e Gerenciamento	3	24	24	64	1000
25	Administração de Rede	4	25	25	64	1000

Para a realização dessas simulações, foram considerados os seguintes parâmetros de entrada de acordo com as especificações da ISO11783: velocidades de transmissão de dados de 250 Kbits/s, versão CAN 2B (ID 29 bits). Inicialmente, foram realizadas simulações desses três esquemas de prioridade para determinação do melhor esquema a ser escolhido para o conjunto de mensagens do robô agrícola.

As Tabelas 16 e 17 exemplificam os resultados obtidos utilizando-se do esquema de prioridades P2.

Tabela 16 – Tempo de Transmissão do Conjunto de Mensagens da Rede CAN com Esquema de Prioridades P2

Caracterização do Conjunto de Mensagens				Tempo de Transmissão das Mensagens	
Nº	Dados (Bits)	Prioridade	Período (ms)	Rm (ms) – Condições Normais	Rm Erro (ms) – Condições Erro
1	16	1	50	1,14	1,66
2	16	2	50	1,54	2,06
3	16	3	50	1,94	2,46
4	16	4	50	2,34	2,86
5	16	5	50	2,74	3,26
6	16	6	50	3,14	3,66
7	16	7	50	3,54	4,06
8	16	8	50	3,94	4,46
9	16	9	100	4,34	4,86
10	16	10	100	4,74	5,26
11	16	11	100	5,14	5,66
12	16	12	100	5,54	6,06
13	16	13	100	5,94	6,46
14	16	14	100	6,34	6,86
15	16	15	100	6,74	7,26
16	16	16	100	7,14	7,66
17	64	17	300	7,78	8,54
18	64	18	300	8,42	9,18
19	32	19	500	8,90	9,66
20	32	20	250	9,38	10,14
21	32	21	1000	9,86	10,62
22	64	22	1000	10,50	11,26
23	64	23	1000	11,14	11,90
24	64	24	1000	11,78	12,54
25	64	25	1000	11,78	12,54
Tempo de Resposta (Total)				155,78	171,04

Tabela 17 – Valores de Otimização e Taxas de Utilização para a Rede CAN

Velocidade de Transmissão do Barramento	250KBit/s
Taxa de Utilização de Mensagens	1,90%
Taxa de Utilização do Barramento	10,62%
Valor para Otimização da Taxa de Utilização do Barramento	9,23

Na Tabela 16 são mostrados dados referentes aos tempos de transmissão das mensagens, e o tempo de resposta, enquanto na Tabela 17 são mostrados dados referentes às taxas de utilização e valor para otimização da taxa de utilização. Com a aplicação do programa de simulação para os outros esquemas de prioridades P1 e P3, da Tabela 15, obtiveram-se novos resultados da mesma forma que os apresentados para o esquema P2 nas

Tabelas 16 e 17. De forma a resumir a apresentação desses resultados, a Tabela 18 sintetiza os principais dados referentes às aplicações do programa para os três esquemas de prioridades citados.

Tabela 18 – Resultados das Simulações para Determinação do Esquema de Prioridades para o Conjunto de Mensagens da Rede CAN

Resultados para o Conjunto de Mensagens		Esquemas de Prioridades		
		P1	P2	P3
Taxa de Utilização do Barramento (%)		10,62	10,62	10,62
Taxa de Eficiência do Barramento (%)		6,47	10,34	9,65
Valor para Otimização da Taxa de Utilização do Barramento		6,89	9,23	8,25
Tempo de Transmissão Total (ms)	Condições Normais (Rm)	172,58	155,78	155,14
	Condições Erro (Rm erro)	191,68	171,04	170,24

A Tabela 18 apresenta os resultados da aplicação do programa de simulação para o conjunto de mensagens descrito na Tabela 15 para os três esquemas de prioridades propostos para análise. De acordo com os dados mostrados, é possível verificar que o esquema de prioridades P2 foi o que apresentou melhores resultados. Isso pode ser visto de acordo com os valores dos dados de eficiência e de valor para otimização da taxa de utilização do barramento.

Portanto, o esquema de prioridades P2 será escolhido para aplicação no conjunto de mensagens do robô agrícola móvel e a partir dele, outras simulações de operação da rede CAN embarcada serão realizadas. A Tabela 19 especifica os parâmetros de configuração, alterados em relação ao conjunto de mensagens original da Tabela 15 com esquema de prioridades P2 (correspondente a simulação S1), que foram utilizados para as novas simulações realizadas (simulações S2, S3 e S4).

Tabela 19 – Especificações dos Parâmetros Alterados em Relação ao Conjunto de Mensagens da Rede CAN
para Simulações de Operação do Robô Agrícola

Simulação	Alteração em Relação ao Conjunto Original	Finalidade
S1	Conjunto de Mensagens Original – Tabela 15, Prioridades P2	Padrão
S2	Dados (bits) de todas as mensagens = 64	Analisar aumento de carga de dados na rede
S3	Aumento de 10 mensagens (sendo 5 mensagens com Dados = 64 e T = 500 ms e 5 mensagens com Dados = 64 e T = 1000 ms)	Analisar aumento do tráfego de mensagens na rede
S4	Período T (ms) (sendo de 50 ms para 10 ms nas mensagens 1 a 8, de 100 para 20 ms para as mensagens 8 a 16 e de 1000 para 100 ms para as mensagens 21 a 25)	Analisar o dimensionamento de parâmetros da rede

A partir dos dados da Tabela 19, são realizadas quatro simulações diferentes com o programa de simulação e os resultados são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Comparação dos Resultados das Simulações de Operação da Rede CAN

(a) Gráfico Taxa de Utilização de Mensagens, (b) Gráfico Taxa de Utilização do Barramento, (c) Gráfico Valor de Otimização da Taxa de Utilização do Barramento e (d) Gráfico Tempo de Resposta Total das Mensagens sob Condições de Erro

Através da análise dos resultados obtidos, é possível obter informações que contribuem para o dimensionamento de parâmetros e para o conhecimento da operação da rede CAN projetada. As etapas das simulações permitiram definir uma configuração otimizada para a rede CAN do robô. Os resultados das análises de tempo de resposta, mostrados na Figura 30(d) mostram que o sistema de controle distribuído proposto para o robô agrícola apresenta tempo de resposta satisfatório para cumprir o requisito temporal de cada mensagem. Tal requisito demanda que o tempo de transmissão de cada uma das mensagens, sob condições normais e de erro, tem que ser menor que o seu período de amostragem. Diante disso, conclui-se que existe viabilidade para a aplicação da rede CAN analisada ao controle do robô agrícola móvel. Esse fato é confirmado pelos baixos valores referentes às taxas de utilização do barramento CAN mostrado na Figura 30(b). Esses dados demonstram que o sistema apresenta capacidade disponível para futuras conexões de equipamentos, aumento da carga de dados (quantidade de bits enviados por mensagem) e aumento do tráfego (número de mensagens) de mensagens na rede CAN.

Através das análises referentes aos parâmetros de configuração da rede, verificou-se uma relação de influência entre tais parâmetros com os dados de saída obtidos com o programa. Um exemplo disso, de acordo com as colunas S1 e S2 da Figura 30(a), o aumento do valor da taxa de utilização das mensagens na rede CAN calculadas a partir do aumento na quantidade de bits enviados por mensagem no barramento. De acordo com os dados da Figura 30(c), pode-se verificar o dimensionamento da rede CAN do robô agrícola, de acordo com a diminuição do valor de otimização para a taxa de utilização do barramento. Baixos valores (≈ 1) significam que o sistema está operando com baixo nível de ociosidade para a rede CAN embarcada.

Ressalta-se que outros dados ou parâmetros de entrada, diferentes dos alterados nas simulações mostradas anteriormente, poderiam ser considerados para uma nova simulação.

Entre eles estão os parâmetros: outras velocidades de transmissão (125K, 500Kbits/s), novas configurações de prioridades para o conjunto de mensagens, outra versão do protocolo CAN (CAN 2.0A).

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma detalhada descrição do funcionamento do programa de simulação implementado, dando ênfase às especificações requeridas e as justificativas de escolha do ambiente de programação LabVIEW como ferramenta de desenvolvimento. São realçadas como principais características do programa desenvolvido a interface gráfica, que facilita a utilização do programa, e a geração de relatórios dos dados de saída em planilha eletrônica. Uma validação do programa desenvolvido foi realizada com uma comparação entre dados obtidos com a aplicação do programa com os dados coletados de uma rede experimental montada. Novas possibilidades de uso para o programa foram apresentadas, reafirmando seu potencial e flexibilidade. Para avaliar tais possibilidades foi discutida sua utilização no projeto e dimensionamento de uma rede CAN em um robô agrícola móvel, desenvolvido num projeto de pesquisa FAPESP (processo 03/06582-0).

6. CONCLUSÕES

A utilização do protocolo CAN como padrão de comunicação e controle de dispositivos em soluções de automação na área agrícola tem sido cada vez mais consolidado. Esforços de empresas e instituições de pesquisa, tanto no âmbito nacional quanto no internacional, sustentam um potencial futuro. Verifica-se ainda que um dos principais desafios associados à utilização de soluções baseadas em protocolos de comunicação, como o CAN, diz respeito à dificuldade na definição dos parâmetros de configuração para um bom desempenho da rede. Essa necessidade tem demandado a pesquisa e o desenvolvimento de ferramentas e metodologias para simulação e análise de desempenho, de modo a permitir o dimensionamento desses parâmetros e a otimização da operação dessas redes. Diante da pouca difusão e de não se encontrar ferramentas deste tipo para aplicações de redes CAN na área agrícola, este trabalho desenvolveu uma ferramenta de análise de desempenho de redes CAN direcionado para aplicação em sistemas agrícolas.

Um estudo detalhado da transmissão de mensagens em uma rede CAN foi realizado, auxiliando na pesquisa e sistematização de um modelo matemático de redes baseadas no protocolo CAN. Para a utilização deste modelo, de forma a permitir o cálculo e a análise de parâmetros de configuração e de desempenho de redes CAN, foi proposta uma metodologia de análise. Essa metodologia alcançou grande flexibilidade de utilização, permitindo que diversos parâmetros pudessem ser analisados.

A implementação computacional da metodologia e do modelo matemático constituiu uma tarefa necessária de modo a facilitar os trabalhos de análise e obtenção de dados de desempenho e operação da rede CAN com a realização de diversas simulações. A aplicação do programa de simulação desenvolvido originou dados que permitiram ao projetista estudar o desempenho e a influência dos parâmetros de configuração de uma rede CAN sob

configurações de equipamentos e parâmetros diferenciados. Um experimento de validação foi realizado para coleta de dados de uma rede CAN experimental, os quais foram comparados com dados obtidos com a aplicação do programa desenvolvido. Essa comparação dos dados permitiu a validação e a comprovação da ferramenta desenvolvida.

A utilização do programa de simulação apresentado para o caso do robô agrícola móvel demonstrou sua flexibilidade e potencial de aplicação. Essa utilização simplificou tarefas de análise relacionadas à rede CAN, gerando informações que auxiliaram o projetista no seu projeto e desenvolvimento, além de permitir a obtenção de uma configuração otimizada para o funcionamento da rede CAN projetada.

Através da utilização desse programa de simulação espera-se contribuir com o processo de desenvolvimento e dimensionamento dessas redes, bem como dar suporte e auxiliar na implementação da norma ISO11783 como padrão de comunicação para redes embarcadas em máquinas agrícolas. Espera-se que estes resultados contribuam com grupos de pesquisa em tecnologias de *fieldbus* (CAN) e sistemas embarcados, difundindo conhecimento e viabilizando sua implementação por empresas no mercado nacional na área agrícola.

6.1 CONTRIBUIÇÕES

Podem ser citadas as seguintes contribuições deste trabalho:

- ü Estudo temporal da transmissão de mensagens em uma rede CAN;
- ü Modelo de equações matemáticas sistematizado para redes CAN, o qual tem incorporado simulações de condições de erro (erros de transmissão e tempo de retransmissão de mensagens);

- ü Metodologia de análise proposta, que fornece uma grande flexibilidade de aplicação e utilização para o modelo matemático;
- ü Programa Computacional de Simulação que implementa a metodologia de análise facilitando as tarefas de simulação de operação e obtenção de dados da rede CAN;
- ü Montagem da rede CAN experimental, que demonstra uma implementação do tráfego de mensagens de acordo com a norma ISO11783;
- ü Interface Serial RS232 de Comunicação entre PC – ECU desenvolvida, que possibilita o controle e supervisão de aplicações de uma rede CAN (ISO11783) por parte do desenvolvedor ou projetista;

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Entre as perspectivas desse trabalho, espera-se que através da implementação do programa feita no ambiente de programação LabVIEW, gerando arquivos executáveis que podem ser executados em qualquer máquina e possibilitando uma fácil conversão e utilização do programa para ambiente WEB, possa ocorrer a difusão do trabalho e que o mesmo possa auxiliar e ser utilizado por outros desenvolvedores e instituições de pesquisa e ensino.

Em relação à possibilidade de melhorias e trabalhos futuros relacionados a esse trabalho, são propostas as tarefas de estudo para analisar a viabilidade de inclusão no modelo sistematizado, da transmissão de mensagens não periódicas ou por evento. Para esta tarefa fica como idéia inicial a inclusão de uma mensagem deste tipo, como sendo a de maior prioridade para o conjunto de mensagens do sistema.

Outra tarefa que poderia ser analisada diz respeito à avaliação da possibilidade de se desenvolver um banco de dados para que o programa implementado pudesse realizar várias simulações consecutivas e gerar gráficos automaticamente, simplificando ainda mais as tarefas de análise de resultados.

REFERÊNCIAS*

AGCO. (2002). AGCO Corporation, Disponível em: <<http://www.agcocorp.com>> ou <<http://www.agco.com.br/>>. Acesso em Julho. 2006.

AUERNHAMMER, H. (2001). Precision farming: the environmental challenge. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 30, n. 1-3, p. 31-43.

_____. (2004). Off-Road Automation Technology in European Agriculture - State of the Art and expected Trends. In: AUTOMATION TECHNOLOGY FOR OFF-ROAD EQUIPMENT, 2004 ASAE International Conference, 2004, Kyoto, Japan. **ASAE Publication** 701P1004. 7-8 October. p. 010-023.

AUERNHAMMER, H.; ROTHMUND, M. (2004). Automated Process Data Acquisition within standardized Communication Systems and its Practical Applications. In: CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE, Olympics of Agricultural Engineering, 2004, Beijing, China. **Proceedings**. 11-14 October. v. 2.

AUERNHAMMER, H.; SPECKMANN, H. (2006). Dedicated Communication Systems and Standards for Agricultural Applications. Chapter 7 Communication Issues and Internet Use, **CIGR Handbook of Agricultural Engineering**. v. 7, p. 435-452.

BENITO, M. D. R.; FUERTES, J. M.; KAHORAH, E.; ARZOZ, N. P. (1999). Performance Evaluation of Four Fieldbuses. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 7, 1999, Barcelona, Spain. **Proceedings**. 18-21 October. v. 2, p. 881-890.

BENNEWEIS, R.K. (2005). Status of the ISO11783 Serial control and communications data network standard. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2005, Tampa, Florida. **ASAE paper** No. 051167. 17-20 July.

BOSCH. (2006). CAN Specification Version 2.0. Robert Bosch GmbH, Disponível em: <<http://www.bosch.can.com>>. Acesso em: Julho. 2006.

BRAZ, D. C.; SOUSA, R. V.; INAMASU, R. Y.; PORTO, A. J. V. (2004). Desenvolvimento de uma interface CAN para integração de dispositivos embarcados em máquinas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 33, 2004, São Pedro. **Anais**. São Pedro. 1 CD-ROM.

BRILL, R. J.; LUKKIEN, J. J.; DAVIS, R. I.; BURNS, A. (2006). Message response time analysis for ideal controller area network (CAN) refuted. In: INTERNATIONAL

* De acordo com: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

WORKSHOP ON REAL-TIME NETWORKS – WRTN, 5, 2006, Dresden, Germany. **Proceedings**, 4-7 July.

CASE IH. (2006). Case IH do Brasil – Equipamentos Agrícolas. Disponível em: <<http://www.caseih.com>>. Acesso em: Julho. 2006.

CASE NEW HOLLAND. (2006). Agricultural Equipment Area Business – Brasil. Disponível em: <<http://www.newholland.com/home.asp>>. Acesso em: Julho. 2006.

CAVALIERI, S.; DI STEFANO, A.; LO BELLO, L.; MIRABELLA, O. (1996). CAN Assessment in Time-Critical Cyclic Applications through Petri Net Model, **IEEE Control Systems Magazine**, p. 922-927.

CERVIN, A.; HENRIKSSON, D.; LINCOLN, B.; EKER, J.; ARZEN, K. (2003). How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterburg and Truetime. **IEEE Control System Magazine**, p. 16-30, June.

CIA. (2005). CAN in Automation. Disponível em: <[http:// www.can-cia.org/](http://www.can-cia.org/)>. Acesso em: Novembro. 2005.

CUGNASCA, C. E. (2002). **Sistemas Computacionais Embarcados em Máquinas Agrícolas: Estudos e Propostas**. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

DARR, M. J.; STOMBAUGH, T. S.; SHEARER, S. (2005). Controller area network based distributed control for autonomous vehicles. **Transactions of the ASAE**, v. 48 (2), p. 479-490.

DARR, M. J.; STOMBAUGH, T. S.; SHEARER, S. A.; FULTON, J. P. (2004). CAN-based distributed control for autonomous vehicles. In: ASAE ANNUAL MEETING, 2004, Ottawa, Ontario, Canada. **ASAE Paper** No 041155. 1-4 August.

DARR, M. J.; STOMBAUGH, T. S.; WARD, J. K.; MONTROSS, M. D. (2003). Development of a Controller Area Network Based Handheld Data Acquisition System for Identity Preservation. In: ASAE ANNUAL MEETING, 2003, Las Vegas. **ASAE Paper** No 031103. July.

DARR, M.J.; ZHAO, L.; EHSANI, J.K; WARD, J.K; STOMBAUGH, T.S. (2005). Evaluation of the controller area network data collection system in confined animal feeding operations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM LIVESTOCK ENVIRONMENT, 70, 2005, Beijing, China. **ASAE publication** 701P0205, p 179-187. 18-20 May.

DAVIS, R. I.; BURNS, A.; BRILL, R. J.; LUKKIEN, J. J. (2006). Controller Area Network (CAN) Schedulability Analysis: Refuted, Revisited and Revised. **Technical Report**, University of York. Disponível em: <www.cs.york.ac.uk/ftplib/reports/YCS-2006-408.pdf>. Acesso em: Julho. 2006.

FARSI, M.; RATCLIFF, K.; BARBOSA, M. (1999). An overview of controller area network. **Computing & Control Engineering Journal**, v. 10, n. 3, pp.113-120, June.

GODOY, E. P.; SOUSA, R. V., INAMASU, R. Y. (2005). Proposta de Análise de Redes CAN para Suporte ao Desenvolvimento de Sistemas Embarcados em Máquinas Agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E AGROINDÚSTRIA - SBIAGRO, 5, 2005, Londrina. **Anais**. Londrina: 28-30 Setembro. 1 CD-ROM.

GODOY, E. P.; SOUSA, R. V.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. (2006). Análise e Otimização de um Sistema de Controle Baseado no Protocolo CAN para Robô Agrícola Móvel. In: WORKSHOP EM TECNOLOGIAS DE ROBÓTICA NA AGRICULTURA, 2006, EMBRAPA, São Carlos. **Anais**. São Carlos: EESC-USP. 1 CD-ROM.

_____. (2006a). Application of a sampling time scheduling for the optimization of distributed control system based on CAN protocol. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL, AND THEIR APPLICATIONS - DINCON, 5, 2006, Guaratinguetá, SP. **Proceedings**. Guaratinguetá: FEG-UNESP, 22-26 Maio. 1 CD-ROM.

_____. (2006b). Programa Computacional Para Simulação de Redes CAN em Aplicadas em Máquinas Agrícolas. **Revista Brasileira de Agroinformática**, Submetido em 01/2006.

_____. (2006c). Simulação para o Dimensionamento de Parâmetros de Rede CAN Embarcada em Robô Agrícola Móvel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – CONBAP, 2, 2006, São Pedro. **Anais**. São Pedro: ESALQ-USP, 04-07 Junho. 1 CD-ROM.

GODOY, E. P.; TANGERINO, G. T.; SOUSA, R. V.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. (2006). Applied Simulation to Evaluate Data Link Parameters of CAN-Based Networks for Agricultural Machinery. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 8, 2006, Minneapolis, Minnesota. **Proceedings**. Minneapolis: University of Minnesota, 23-26 July. 1 CD-ROM.

GUIMARÃES, A. A. (2003). **Análise da norma ISO11783 e sua implementação no barramento do implemento de um monitor de semeadora**. Dissertação, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

HOFSTEE, J.W.; GOENSE, D. (1997). Simulation of a CAN-based tractor-implement fieldbus according to DIN 9684. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.68, p.89-100, May.

_____. (1999). Simulation of a controller area network-based tractor-implement data bus according to ISO 11783. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 73, n. 4, p. 383-394, August.

INTERBUS. (2006). Informações sobre o Protocolo Interbus de comunicação industrial. Disponível em: <<http://www.interbusclub.com/>>. Acesso em: Julho. 2006.

ISO. (2006). International Standards Organization. Disponível em: <<http://www.iso.org/>>. Acesso em: Julho. 2006.

JAHNS, G.; SPECKMANN, H. (1999). Development and application of an agricultural BUS for data transfer. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 23, n. 3, p. 219-237.

JAIN, R. (1991). **The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling**, Wiley – Interscience.

JEON, J. G.; KIM, D. W.; KIM, H. S.; CHO, Y. J.; LEE, B. H. (2001). An analysis of Network-Based Control System Using CAN (Controller Area Network) Protocol. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS & AUTOMATION, 2001, Seoul, Korea. **Proceedings**. May. v. 4, p. 3577-3581.

JOHN DEERE. (2006). John Deere do Brasil. Disponível em: http://www.deere.com.br/pt_BR/. Acesso em: Julho. 2006.

LANG, F.; ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, L. E. (1999). Development of a CAN based air seeder monitor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 3, 1999, Saint Paul, Madison. **Proceedings**. p. 991-1000.

LI, Y.; FANG, H. (2005). Control methodologies of large delays in networked control systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, 2005. **Proceedings**. v. 2, p. 1225–1230.

LIAN, F. L.; MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M. (2001). Performance evaluation of control networks: Ethernet, Controlnet and Device Net. **IEEE Control Systems Magazine**, p.66-83.

_____. (2002). Network Design Consideration for Distributed Control Systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 10(2), p. 297-307, March.

LIAN, F. L.; YOOK, J. K.; TILBURY, D. M.; MOYNE, J. R. (2006). Network architecture and communication modules for guaranteeing acceptable control and communication performance for networked multi-agent systems. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 2(1), p. 12-24, February.

LOPES, W. C.; CARVALHO, H. J. R.; SOUSA, R. V., INAMASU, R. Y.; PORTO, A. J. V. (2005). Modelagem e Simulação de uma Rede CAN para Aplicação na Área Agrícola Utilizando Redes de Petri Coloridas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E AGROINDÚSTRIA - SBIAGRO, 5, 2005, Londrina. **Anais**. Londrina: 28-30 Setembro. 1 CD-ROM.

MAXIM. (2006). MAX232 Data Sheet. Informações sobre o circuito integrado MAX232 Disponível em: <<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>>. Acesso em: Julho. 2006.

MICROCHIP. (2006). MCP2551 Transceiver Data Sheet. Informações sobre o transceptor MCP2551. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667d.pdf>. Acesso em: Julho. 2006.

_____. (2006a). PIC18F258 Data Sheet. Informações sobre o microcontrolador PIC18F258. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41159d.pdf>. Acesso em: Julho. 2006.

MIETTINEN, M.; OKSANEN, T.; OHMAN, M.; VISALA, A. (2006): Implementation of ISO 11783 compatible task controller. In: CIGR WORLD CONGRESS, 16, 2006, Bonn, Germany. **Proceedings**. 03-07 September. 1 CD-ROM.

MODBUS. (2006). Informações sobre o protocolo Modbus de comunicação industrial. Disponível em: <http://www.modbus.org/>. Acesso em: Julho. 2006.

MOLIN, J. P. Tendências da Agricultura de Precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – CONBAP, 2, 2004, Piracicaba, ESALQ, USP. **Anais...** Palestra: CONBAP. 1 CD-ROM.

NI (2005). National Instruments. Disponível em: <http://www.ni.com/>. Acesso em: Novembro. 2005.

NAGASAKA, Y.; ZHANG, Q.; GRIFT, T. E.; KANETANI, Y.; UMEDA, N.; KOKURYU, T.; (2004). An autonomous field watching-dog robot for information collection in agricultural fields. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2004, Ottawa, Ontário, Canadá. **ASAE paper** No.043092. 1-4 August.

OKSANEN, T., OHMAN, M.; MIETTINEN, M.; VISALA, A. (2005) ISO 11783 – Standard and its implementation. In: IFAC WORLD CONGRESS, 16, 2005, Prague. **Proceedings**. 4-8 July.

OKSANEN, T.; OMAN, M.; MIETTINEN, M.; VISALA, A. (2004). Open Configurable Control System for Precision Farming. In: ASAE INTERNATIONAL CONFERENCE OF AUTOMATION TECHNOLOGY FOR OFF-ROAD EQUIPMENT, 2004, Kyoto, Japan. **ASAE Publication** 701P1004, p 184-191. 7-8 October.

PINHO, L. M.; VASQUES, F. (2001). Timing Analysis of Reliable Real-Time Communication in CAN Networks. In: EUROMICRO CONFERENCE ON REAL TIME SYSTEMS, 13, 2001, Netherlands. **Proceedings**. IEEE Computer Society Press, p. 103-112.

PINHO, L. M.; VASQUES, F.; TOVAR, E. (2000). Integrating inaccessibility in response time analysis of CAN networks. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON FACTORY COMMUNICATION SYSTEMS, 3, 2000, Porto, Portugal. **Proceedings**. September. p. 77-84.

PORTO, A. J. V.; SOUSA, R. V.; INAMASU, R. Y. (2003). Robô Agrícola Móvel (RAM): uma revisão das pesquisas recentes sobre sistemas de navegação autônoma de robôs e

veículos agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E AGROINDÚSTRIA - SBIAGRO, 4, 2003, Porto Seguro. **Anais**. SBIAGRO. 1 CD-ROM.

PORTO, A. J. V.; SOUSA, R. V.; SILVA, A. R. Y.; INAMASU, R. Y. (2005). Veículos Agrícolas Autônomos (VAA's) e Robôs Agrícolas Móveis (RAM's). In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES - DINCON, 4, 2005, Bauru. **Anais**. DINCON. 1 CD-ROM.

PROFIBUS. (2006). Informações sobre o protocolo Profibus de comunicação industrial. Disponível em: <<http://www.profibus.org/>>. Acesso em: Julho. 2006.

PUNNEKKAT, S.; HANSSON, H. A.; NORSTROM, C. (2000). Response Time Analysis under Errors for CAN. In: IEEE SYMPOSIUM OF REAL-TIME TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, 2000, Washington, USA. **Proceedings**. p. 258-266.

RAUCHAUPT, L. (1999). Performance Analysis of CAN based Systems. Disponível em: <<http://www.kvaser.com>>. Acesso em: Novembro. 2005.

RADTKE, I.; KRUTZ, G.; DECKARD, A. D. (2005). Design of Power-Transmitting Hydraulic Hose with Integrated Controller Area Network and Life-Sensing Capability. In: ASAE CONFERENCE OF AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY, 2005, Louisville, Kentucky. **ASAE Paper** No 05003. 13-15 February.

SAE. (2006). The Society of Automotive Engineers. Disponível em: <<http://www.sae.org/>>. Acesso em: Setembro. 2005.

SANTOS, M. M., STEMMER, M. R., VASQUEZ, F. (2002). Schedulability Analysis of Messages in a CAN Network Applied to an Unmanned Airship. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 28, 2002, Seville, Spain. **Proceedings**. 5-8 November.

SANTOS, M. M., VASQUEZ, F., STEMMER, M. R. (2004). Performance Analysis of Networked Control Systems over CAN and Token Passing Networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL APPLICATIONS - INDUSCON, 6, 2004, Itajaí. **Proceedings**. v. 1. p. 120-128.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E. (1998). Sistemas para agricultura de precisão: equipamentos e programas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais**. Cap.5, p. 159-202.

SERÔDIO, C.; CUNHA, J. B.; MORAIS, R.; COUTO, C.; MONTEIRO, J. (2001). A Networked Platform for Agricultural Management Systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, p. 75-90.

SIGRIMIS, N.; MUNACK, A.; HASHIMOTO, Y.; BAERDEMAEKER, J. (2000). Prospects in Agricultural Engineering in the Information Age. **CIGR e-Journal**, Invited paper, p. 1-20.

SILVA, K. M. R. (2003). **Agrican**: Simulador de redes baseadas no protocolo ISO 11783 para ambiente WEB. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SMAR. (2006). Informações sobre o protocolo Foundation Fieldbus para comunicação industrial. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/fieldbus.asp>>. Acesso em: Julho. 2006.

SOUSA, R. V. (2002). **CAN (Controller Area Network)**: uma abordagem para automação e controle na área agrícola. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SPRENG, V.; ROTHMUND, M.; AUERNHAMMER, H. (2006): Data Communication Networking in Precision Livestock Farming for improved Calf-Rearing. In: CIGR WORLD CONGRESS, 16, 2006, Bonn, Germany. **Proceedings**. 03-07 September. 1 CD-ROM.

STEPPER, M. R. (1993). J1939 high speed serial communication: the next generation network for heavy-duty vehicles. In: SAE FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE, 1993, San Antonio, Warrendale. **Proceedings**. SAE Technical Paper Series No 931809, p.1-20.

STONE, M. L. (1997). Dynamic address configuration in SAE J1939. In: SAE SYMPOSIUM ON OFF-HIGHWAY EQUIPMENT, 1997, Milwaukee. **Proceedings**. SAE Transactions, p. 310-315.

STONE, M. L.; MCKEE, K. D.; FORMWALT, C. W.; BENNEWEIS, R. K. (1999). An Electronic Communications Protocol for Agricultural Equipment. In: ASAE AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 1999, Louisville, Kentucky. **ASAE Distinguished Lecture # 23**, February.

STONE, M. L.; ZACHOS, M. (1993). Application of J1939 networks in agricultural equipment. In: ASAE INTERNATIONAL WINTER MEETING, 1993, Saint. Joseph, Chicago. **ASAE Paper** No 931535.

STRAUSS, C. (2001). **Implementação e avaliação de uma rede experimental baseada em CAN para aplicações agrícolas**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

STRAUSS, C.; CUGNASCA, C. E.; SARAIVA, A. M.; HIRAKAWA, A. R. (1999). Applications of the CAN and ISO 11783 protocols to a planter monitor. In: WORLD MULTICONFERENCE ON CIRCUITS, SYSTEMS, COMMUNICATION AND COMPUTERS, 3, 1999, Danvers, Athens, **Proceedings**.

SUVINEN, A.; SAARILAHTI, M. (2006) Measuring the mobility parameters of forwarders using GPS and CAN bus techniques. **Journal of Terramechanics**. v. 43, p. 237-252.

SZABO, S.; SINGULE, V.; OPLUSTIL, V.; KRAL, R. (2002). Autonomous mobile robot with multiprocessor control system. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED MOTION CONTROL, 7, 2002, Slovenia. **Proceedings**. July, p. 467-471.

TANENBAUM, A.S. (1997). **Redes de computadores**. 3.ed. Rio de Janeiro. Editora Campus.

TINDELL, K.; BURNS, A. (1994). Guaranteed Message Latencies for Distributed Safety Critical Hard Real-Time Networks, **Technical Report YCS 229**, Department of Computer Science, University of York, England.

_____. (1994a). Guaranteeing Message Latencies on Controller Area Network (CAN), In: IEEE INTERNATIONAL CAN CONFERENCE, 1, 1994, Mainz, Germany. **Proceedings**. September.

TINDELL, K.; BURNS, A., WELLINGS, A. (1995). Calculating Controller Area Network (CAN) Message Response Time. **Control Engineering Practice**, v. 3, n. 8, p. 1163-1169.

TIPSUWAN, Y.; CHOW, M. Y. (2003). Control Methodologies in Networked Control Systems. **Control Engineering Practice**, v. 11, n. 3, p. 1099-1111.

UPENDER, B. P.; DEAN, A. G. (1996). Variability of CAN Network Performance, In: IEEE INTERNATIONAL CAN CONFERENCE, 3, 1996, Paris, France. **Proceedings**. p. 1151-1159.

VECTOR CANTECH. (2006). **Apostila do Curso do Protocolo ISO11783**. Vector Academy Working Knowledge, USA, pp. 240.

YANG, T.C. (2006). Networked control system: a brief survey. **IEEE Proceedings of Control Theory and Applications**, v. 153, n 4, July, p. 403–412.

WITTENMARK, B.; NILSSON, J.; TORNGREN, M. (1995). Timing problems in real-time control systems. In AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1995, Seattle, Washington. **Proceedings**. p. 2000–2004.