



DINCON' 2007

6th Brazilian Conference on Dynamics,
Control and Their Applications

IBILCE - UNESP
S. J. Rio Preto, SP
Brazil

May 22- 25, 2007

Proceedings of the 6th Brazilian Conference on
Dynamics, Control and Their Applications

ISBN: 978-85-85769-32-1



Spida 10731

AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DE DESEMPENHO DE REDES DE CONTROLE CAN – CONTROLLER AREA NETWORK

*Eduardo Paciência Godoy*¹, *Rafael Vieira de Sousa*², *Arthur José Vieira Porto*³, *Ricardo Yassushi Inamasu*⁴

^{1,2,3} Departamento de Engenharia Mecânica, EESC, USP,
13566-590, São Carlos, SP
epgodoy@yahoo.com.br, rafael@cnpdia.embrapa.br, ajvporto@sc.usp.br

⁴ Embrapa Instrumentação Agropecuária,
13560-970, São Carlos, SP
ricardo@cnpdia.embrapa.br

Resumo: Tecnologias de redes de comunicação, como o protocolo CAN (*Controller Area Network*) têm sido amplamente utilizado na área industrial como solução em sistemas de controle distribuído. O projeto e implementação de uma rede de controle CAN demanda o conhecimento e a definição de parâmetros de configuração relacionados com o enlace de dados da rede. Sob este contexto, apresenta-se um estudo temporal da transmissão de mensagens e a sistematização de um modelo matemático para análise de desempenho de redes de controle CAN. A implementação computacional desse modelo permite a realização de simulações que contribuem para o conhecimento da operação da rede CAN e demonstram a influência dos parâmetros de configuração no desempenho do sistema.

Palavras-chave: redes CAN, modelo matemático, análise de desempenho.

1. INTRODUÇÃO

Tecnologias de redes de comunicação fornecem diversos benefícios com a interconexão de equipamentos como computadores e outros dispositivos. Dentre essas tecnologias, as redes de dados ou as redes de controle podem ser usadas, dependendo dos requisitos da informação a ser trocada. As redes de dados são caracterizadas pela transmissão de grandes pacotes de dados, elevadas taxas de transmissão e geralmente não fornecem serviços de tempo real. Redes de controle, no entanto, transmitem pequena quantidade de dados para grandes quantidades de nós ou módulos de processamento distribuídos pela rede garantindo exigências de tempo real. O elemento chave que distingue redes de controle das redes de dados é a potencialidade para suportar as aplicações de tempo real [1].

Nessas redes de controle, os dispositivos conectados têm que compartilhar da melhor maneira possível o meio disponível para a troca de informações. Como solução para este problema, diversos protocolos de comunicação para sistemas de controle via redes (*NCS – Networked control systems*) têm sido pesquisados e desenvolvidos [2]. Dentre esses protocolos, o *Controller Area Network* ou CAN [3] originalmente desenvolvido para aplicações em eletrônica embarcada na área automotiva, vem sendo utilizado em muitas outras aplicações industriais de controle [4].

Uma das principais dificuldades relacionadas ao projeto e utilização de redes de controle é o desenvolvimento de equações e ferramentas de análise para estudar a influência de parâmetros de configuração no desempenho do sistema e simular seu comportamento e operação [5]. Diante disso, muitos trabalhos têm desenvolvido métodos de análise para diferentes tipos de redes e protocolos de comunicação [6]. No caso específico de redes de controle CAN, o trabalho [7] tornou-se referência para o desenvolvimento de outros métodos de análise. A importância desse tipo de pesquisa para redes de controle CAN pode ser demonstrada por trabalhos recentes como [8], [9], [10] e [11].

Não importando o tipo de rede de controle utilizado, o desempenho do sistema sempre é afetado por alterações em seus parâmetros de configuração. Parâmetros como velocidade de transmissão do barramento, tamanho das mensagens de dados, esquemas de prioridades das mensagens e períodos de amostragem dos dispositivos exercem influência no desempenho da rede [1]. Outro critério muito importante em relação a sistemas com redes de controle diz respeito ao cumprimento do requisito temporal de cada mensagem (*deadline*), ou seja, as mensagens têm que ser transmitidas corretamente com um tempo limitado e menor que seu período de amostragem. Caso as mensagens não sejam corretamente transmitidas ou o sistema apresente um alto valor para seu tempo de transmissão, sobreposição e perdas de mensagens podem ocorrer deteriorando o desempenho do sistema.

Nesse trabalho é apresentada uma análise temporal detalhada da transmissão de mensagens e um modelo de equações matemáticas para calcular parâmetros de desempenho e simular o comportamento de uma rede de controle CAN. Um programa computacional que implementa esse modelo de equações é utilizado para avaliar a variabilidade e a influência desses parâmetros de configurações no desempenho do sistema de controle. Simulações são realizadas para diferentes cenários de um caso de estudo proposto e os resultados são apresentados de acordo com o parâmetro de configuração analisado.

2. REDES DE CONTROLE CAN

2.1. Protocolo CAN

De acordo com [3], 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 (*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.

O mecanismo de acesso ao meio é fundamentado no conceito CSMA/CD com NBDA (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection with Non-Destructive Bitwise Arbitration*), o que significa que os nós CAN possuem acesso ao barramento com prioridades determinadas. Ao verificar o status 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.

Dentre as especificações do protocolo CAN em relação à camada de enlace de dados, estão os formatos existentes do quadro de dados. São definidos dois formatos de quadros de dados de mensagem, onde a única diferença está no tamanho do identificador, sendo CAN 2.0 A *Standard* (ID 11 bits) e CAN 2.0 B *Extended* (ID 29 bits) especificados segundo a Figura 1.

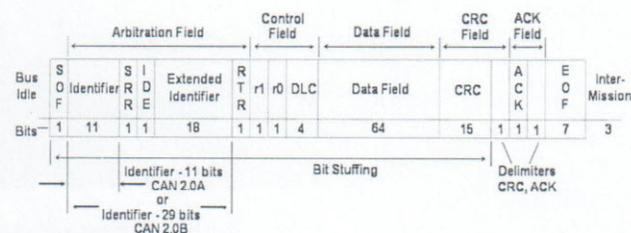


Figura 1. Formatos do Quadro de Dados de Mensagem CAN

2.2. Modelo Matemático de Análise

O aumento da utilização de redes de controle CAN em soluções de comunicação tempo real realça a importância da realização de análises temporais e de desempenho [1]. 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 2 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.

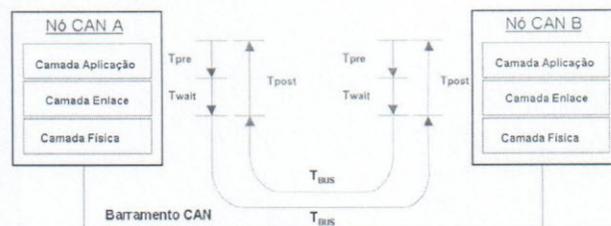


Figura 2. Diagrama Temporal da Transmissão de uma Mensagem CAN (Adaptado de [1])

O tempo total de transmissão da 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 mostrado na Figura 2. 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 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 na rede de controle 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 [1], estes valores T_{pre} e T_{post} são tipicamente constantes e pequenos. Por causa desse fato e para não excluí-los dos cálculos, uma relação desses valores com o *Jitter* (variabilidade do intervalo de tempo entre mensagens consecutivas serem inseridas e retiradas da fila de mensagens da rede [8]) da rede foi adotada.

$$\begin{aligned}
 T_{delay} &= T_{src} - T_{dest} \\
 &= T_{pre} + T_{wait} + T_{bus} + T_{post} \\
 &= \underbrace{T_{pre} + T_{post}}_{J_m} + \underbrace{T_{wait}}_{Q_m} + \underbrace{T_{bus}}_{C_m}
 \end{aligned} \quad (1)$$

As equações que definem os termos mostrados em (1) são descritos para redes de controle CAN e uma relação entre (1) e (2) é apresentada. De acordo com [7], a equação (2) representa o tempo de transmissão total de uma mensagem (m) em uma rede CAN.



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

O termo J_m representa o *Jitter* da mensagem e é determinado empiricamente, utilizando-se J_m igual 0,1 milissegundo (ms). O termo Q_m representa o tempo gasto por uma mensagem na fila de espera com a rede operando sob condições de erro (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 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. Apenas um número T desta quantidade O de bits de *overhead* está sujeito ao *stuffing* (campos não sujeitos ao bit *stuffing* na Figura 1: *Delimiters CRC, ACK e EOF*). Assim, o termo C_m da equação (2) é dado pela equação (3).

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

T = Quantidade de bits de *overhead* sujeita ao bit *stuffing*,

O = número máximo de bits de *overhead*,

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

τ_{bit} = tempo para transmitir um bit sobre o barramento (encontrado de acordo com a velocidade de transmissão: em bits por segundo – bit/s).

[12] define que os valores das variáveis T e O são diferentes para os formatos do quadro de dados da mensagem CAN. Para o formato CAN 2A, os valores de T e O são 34 e 47 e para o formato CAN 2B, os valores são 54 e 67 respectivamente.

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 Q_m é dado por uma relação de recorrência (4) com valor inicial $Q_m^0 = 0$ e com interações até a convergência (i.e. $Q_m^{n+1} = Q_m^n$).

$$Q_m^{n+1} = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left[\frac{Q_m^n + J_j + \tau_{bit}}{T_j} \right] C_j + E_m(Q_m + C_m) \quad (4)$$

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

B_m = tempo de bloqueio no pior caso da mensagem (m) e é dado por (5),

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 de C_j , C_k são obtidos da equação (3).

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 intervalo de tempo (t), definido pela equação (6).

$$E_m(t) = \left(n_{error} + \left\lfloor \frac{t}{T_{error}} \right\rfloor - 1 \right) \cdot (31 \cdot \tau_{bit} + \max_{\forall k \in hp(m) \cup \{m\}} (C_k)) \quad (6)$$

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

T_{error} = período de ocorrência do erro.

São definidos os valores de n_{error} igual a 1 e T_{error} igual 100 ms, de acordo com [7], para utilização da equação (6).

Em cada erro o *overhead* de recuperação de erros pode ser aumentado em 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 (7).

$$\max_{\forall k \in hp(m) \cup \{m\}} (C_k) \quad (7)$$

Outro parâmetro muito utilizado para avaliação de desempenho de redes de controle CAN é a taxa de utilização do barramento. A equação (8) define esse o cálculo desse parâmetro.

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{T_i} \quad (7)$$

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

T_i = período de amostragem da mensagem i ;

N = número total de mensagens na rede.

O conjunto de equações apresentado constitui um modelo matemático que pode ser utilizado para análises de redes CAN sob configurações e parâmetros diferenciados.

3. DESEMPENHO DE REDES CAN

3.1. Estudo de Caso

Nesta parte do trabalho, parâmetros de configuração são definidos e é analisado um caso de estudo de um sistema de controle via rede CAN. Conforme mostrado na Figura 3, este sistema é composto por um conjunto de 3 malhas de controle e 15 mensagens de dados referentes aos dispositivos conectados pela rede CAN (sensores e atuadores).

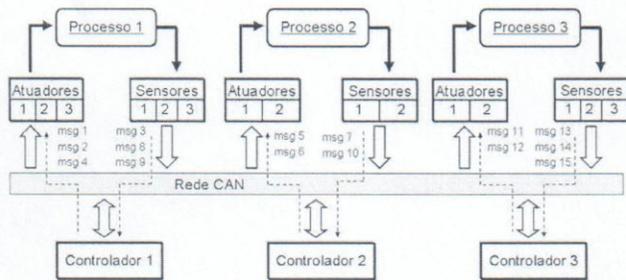


Figura 3. Sistema de Controle via Rede CAN com três Malhas de Controle

Cada um desses dispositivos possui uma determinada mensagem CAN (msg). E cada mensagem CAN possui como características uma quantidade de dados (Q), um período de amostragem (P) e uma prioridade de acesso ao meio de comunicação. Para este caso de estudo, a prioridade de cada mensagem foi definida de acordo com sua respectiva numeração (msg1 tem prioridade 1 ou a maior do sistema). A Tabela 1 descreve esse conjunto de mensagens para a rede CAN do caso de estudo.

Tabela 1 – Descrição do Conjunto de Mensagens da Rede CAN

Malha	Dispositivo	MSG	T (Bytes)	P (ms)
1	Atuadores	1, 2, 4	4	10
	Sensores	3, 8, 9	8	30
2	Atuadores	5, 6	6	40
	Sensores	7, 10	6	40
3	Atuadores	11, 12	2	20
	Sensores	13, 14, 15	6	50

Para facilitar trabalhos de análise e obtenção de dados de desempenho da rede de controle CAN proposta foi utilizado um programa de simulação que implementa o modelo de análise composto pelas equações matemáticas apresentadas. Essa ferramenta computacional descrita e validada em [12] foi utilizada segundo o fluxograma mostrado na Figura 4.



Figura 4. Fluxograma de Utilização do Modelo de Análise de Redes CAN

3.2. Simulações Realizadas

Para a utilização do programa de simulação de redes CAN são consideradas simulações com parâmetros de configurações diferenciados para o caso de estudo apresentado. Essas simulações são utilizadas para se calcular dados que permitam uma análise de desempenho e o estudo da influência da alteração de parâmetros de configuração na operação do sistema de controle. Inicialmente, são realizadas simulações para a análise do parâmetro de configuração velocidade de transmissão do barramento CAN. Para isso, são consideradas as velocidades de 125k, 250k e 500Kbits/s e 1Mbit/s.

Análise para Velocidades de Transmissão

A velocidade de transmissão do barramento tem uma relação direta entre a capacidade disponível para o aumento da utilização da rede e o desempenho da aplicação. Baixos valores de velocidade podem conduzir ao não cumprimento dos requisitos temporais das mensagens (*deadline*), diminuição do desempenho e uma capacidade disponível limitada para um aumento de carga. Entretanto, altos valores de velocidade podem reduzir o comprimento máximo do barramento, aumentar a susceptibilidade ao ruído e demandar um aumento do número de dispositivos interfaceados pela aplicação.

A Figura 5 apresenta os resultados da simulação da rede CAN para as velocidades de transmissão analisadas.

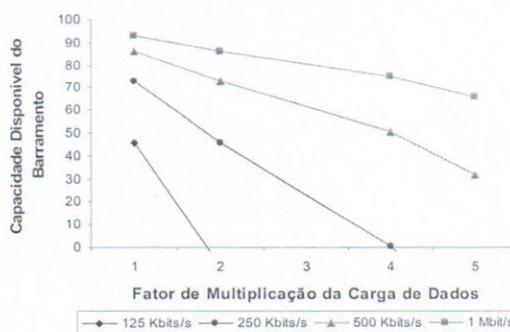


Figura 5. Utilização da Rede CAN em Relação ao Aumento da Carga de Dados

Este tipo de análise é importante para se determinar a capacidade de um sistema de controle suportar um aumento de carga de dados transmitidos pela rede. Tal aumento pode ser proveniente de um aumento do número de mensagens transmitidas ou do aumento da quantidade de dados transmitidas por mensagem do sistema de controle.

Análise para Deadlines de Mensagens Perdidas

A sobreposição ou a perda das mensagens causada pelo não cumprimento dos *deadlines* deteriora o desempenho, tornando o sistema instável. De acordo com a Figura 6, dobrando o valor da carga de dados da rede, uma porcentagem de 48% das mensagens não cumpriria suas *deadlines*. Para um aumento acima de quatro vezes na carga de dados, pode ser visto que apenas a velocidade de 1Mbit/s estaria de acordo com os requisitos de comunicação.

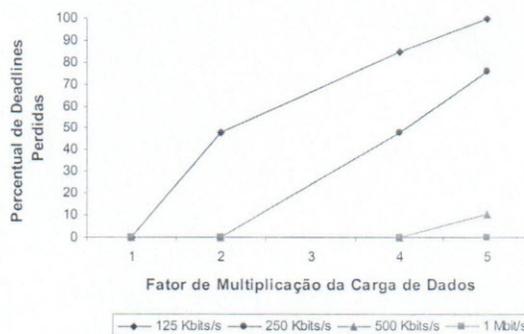


Figura 6. Mensagens Perdidas em Relação ao Aumento da Carga de Dados na Rede CAN



Dincon'2007

Análise para Formatos do Quadro de Dados de uma Mensagem CAN

O protocolo CAN especifica dois formatos do quadro dados para uma mensagem CAN (CAN 2A e CAN 2B), descritos no item 2.1. A Tabela 2 apresenta a comparação entre os resultados das simulações da influência desse parâmetro de configuração no desempenho do sistema de controle do caso de estudo.

O resultado referente ao tempo de transmissão total das mensagens é constituído pela soma dos tempos de transmissão de todas as mensagens do conjunto de dados do caso de estudo.

Tabela 2 – Comparação das Análises dos Tipos de Mensagem CAN para Rede com Velocidade de 250 kbits/s

Parâmetro	CAN 2A	CAN 2B
Taxa de Utilização do Barramento	27,16 %	36,76 %
Tempo Total de Transmissão das Mensagens	70,94 ms	85,84 ms

Análise de Tempo de Transmissão de Mensagens

De forma a simplificar as análises dos parâmetros seguintes, serão considerados os parâmetros de configuração: velocidade de transmissão igual a 250kbits/s e formato do quadro de dados CAN 2.0A.

Os resultados obtidos para o conjunto de mensagens proposto no caso de estudo pode ser visto na Tabela 3. São dados de saída obtidos, os tempos de transmissão de cada mensagem no barramento e o tempo total de transmissão do conjunto de mensagens.

Tabela 3 – Tempo de Transmissão das Mensagens – Rm

Mensagem	Rm (ms)	Mensagem	Rm (ms)
1	1,52	9	5,36
2	1,90	10	5,82
3	2,60	11	6,12
4	2,98	12	6,42
5	3,44	13	6,88
6	3,90	14	7,34
7	4,36	15	7,34
8	4,90	Total (ms)	70,94

Este tipo de análise é importante para se verificar se o sistema de controle cumpre os requisitos temporais de cada mensagem. Este requisito determina que o valor encontrado para o tempo de transmissão de cada uma das mensagens tem que ser menor que seu período de amostragem.

Análise do Tamanho das Mensagens de Dados

A influência do parâmetro tamanho das mensagens de dados (número de bits do campo *Data Field* de uma mensagem) em uma rede CAN pode ser analisada através de simulações do conjunto de mensagens do caso de estudo sob diferentes valores para os tamanhos das mensagens. Respeitando-se a especificação do tamanho máximo de oito bytes para uma mensagem CAN, foram realizadas simulações para o conjunto original do caso de estudo mostrado na tabela 1 (simulação S1) e foram propostas

outras duas simulações. Uma simulação com todas as mensagens do conjunto com tamanho igual a 4 bytes (simulação S2) e outra com todas as mensagens com tamanho igual a 8 bytes (simulação S3). A figura 7 apresenta os resultados.

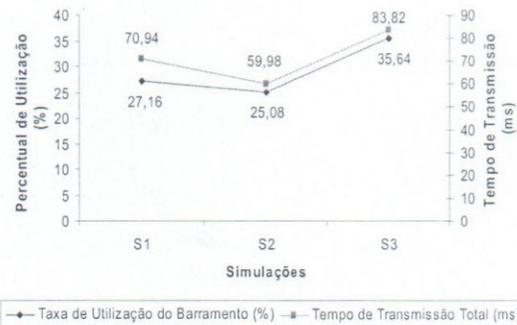


Figura 7. Influência do Parâmetro Tamanho das Mensagens no Desempenho da Rede CAN

Análise do Período de Amostragem das Mensagens

[13] define a relação entre o período de amostragem das mensagens e o desempenho de um sistema de controle via redes como um dos principais conceitos a serem estudados e analisados. Essa dependência reafirma a importância desse tipo de análise para a rede de controle CAN do caso de estudo.

Assim, para o caso do parâmetro período de amostragem das mensagens, foi concebido procedimento semelhante ao descrito anteriormente. Para realização das simulações, foram utilizados os períodos de amostragem das mensagens descritos no conjunto original do caso de estudo mostrado na tabela 2 (simulação S1) e foram propostas outras duas simulações. Uma com todos os períodos de amostragem das mensagens do conjunto com valor igual a 40 ms (simulação S4) e outra com todas as mensagens com valor igual a 15 ms (simulação S5). A figura 8 apresenta os resultados.

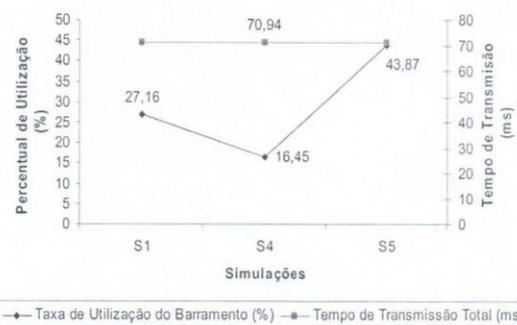


Figura 8. Influência do Parâmetro Período de Amostragem das Mensagens no Desempenho da Rede CAN

De acordo com o gráfico da Figura 8, nota-se que para a configuração do sistema proposto no caso de estudo e para os parâmetros especificados, a alteração no valor dos períodos de amostragem das mensagens não teve influência sobre os valores obtidos para o parâmetro tempo de

transmissão total das mensagens. Porém percebe-se que essas alterações tiveram grande influência nos resultados obtidos para a taxa de utilização da rede CAN.

Um fato importante de se ressaltar é que a utilização do programa desenvolvido poderia ser realizada para quaisquer outros tipos de parâmetros de configuração ou conjunto de mensagens requeridas, demonstrando o potencial de aplicação e flexibilidade do modelo de análise desenvolvido. Uma futura aplicação poderia ser a análise de desempenho de um conjunto de mensagens sob a alteração dos valores das prioridades de acesso ao barramento das mensagens, fato que não foi estudado neste trabalho.

3. CONCLUSÕES

As grandes contribuições dadas por esse trabalho dizem respeito à análise temporal da transmissão de mensagens apresentada e o modelo de análise baseado em equações matemáticas descrito para calcular parâmetros de desempenho e estudar o comportamento de operação de uma rede de controle CAN.

A aplicação da ferramenta computacional, que implementa o modelo de análise, origina dados que permitem ao projetista estudar o desempenho e a influência dos parâmetros de configuração de uma rede CAN sob configurações de equipamentos e parâmetros diferenciados.

Para a configuração do sistema de controle via rede CAN descrito no caso de estudo, simulações foram realizadas para a análise de vários parâmetros de configuração da rede. Resultados obtidos demonstraram a variabilidade de desempenho desses sistemas de controle em relação aos parâmetros analisados.

AGRADECIMENTOS

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [3] G. M. Rocha, G. A. Kyriazis “A Software for the Evaluation of the Stability of Measuring Standards Using Bayesian Statistics”, Proceedings of the 13th International Symposium on Measurements for Industry Applications, pp 386-391, Athens, September 2004.
- [1] F. L. Lian, J. R. Moyne, D. M. Tilbury, “Network Design Consideration for Distributed Control Systems”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10(2), pp. 297-307, March 2002.
- [2] T. C. Yang, “Networked control system: a brief survey”, IEEE Proceedings of Control Theory and Applications, Vol. 153, No 4, pp. 403 – 412, July 2006.
- [3] Bosch, 2006, “CAN 2.0 Specification Version”, Available: <http://www.can.bosch.com>.
- [4] H. F. Othman, Y. R. Aji, F. T. Fakhreddin, A. R. Al-Ali, “Controller Area Networks: Evolution and Applications”, Proceedings of the 2nd International Conference on Information and Communication Technologies - ICTTA 06, Vol. 2, pp. 3088-3093, 24-28 April 2006.
- [5] A. Cervin, D. Henriksson, B. Lincoln, J. Eker, K. E. Arzen, “How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and Truetime”, IEEE Control System Magazine, Vol. 23, pp. 16-30, June 2003.
- [6] M. Torngren, D. Henriksson, K. E. Arzen, A. Cervin, Z.

- Hanzalek, “Tool supporting the co-design of control systems and their real-time implementation: current status and future directions”, Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 1173-1180, Munich, Germany, 4-6 October 2006.
- [7] K. Tindell, A. Burns, A. Wellings, “Calculating Controller Area Network (CAN) Message Response Time”, Control Engineering Practice, Vol. 3, No. 8, pp. 1163- 1169, 1995.
- [8] M. M. Santos, F. VASQUEZ, M. R. Stemmer, “Performance Analysis of Networked Control Systems over CAN and Token Passing Networks”, Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Industrial Applications - INDUSCON, Vol. 1, pp. 120-128, Itajaí, 2004.
- [9] J. A. de Frutos, E. Cadiñanos, J. I. Pérez, S. García, “Tool for Analysis and Simulation of TTCAN Communication in Distributed Systems”, Proceedings of the 30th Annual International Conference on Computer Software and Applications - COMPSAC'06, Vol. 2, pp. 119-122, September 2006.
- [10] R. J. Brill, J. J. Lukkien, R. I. Davis, A. Burns, “Message response time analysis for ideal controller area network (CAN) refuted”, Computer Science Report No. 06-19, 4 p., Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands, May, 2006.
- [11] A. Cervin, K. E. Arzen, D. Henriksson, M. Lluésma, P. Balbastre, I. Ripoll, A. Crespo, “Control Loop Timing Analysis Using TrueTime and Jitterbug”, Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design, pp. 1194-1199, Munich, Germany, 4-6 October 2006
- [12] E. P. Godoy, “Desenvolvimento de uma Ferramenta de Análise de Desempenho de redes CAN para Aplicações em Sistemas Agrícolas”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 93p., 2007.
- [13] F. L. Lian, J. K. Yook, D. M. Tilbury, J. R. Moyne, “Network architecture and communication modules for guaranteeing acceptable control and communication performance for networked multi-agent systems”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 2(1), pp. 12-24, February 2006.