

Avaliação das propriedades temporais de duas redes de controle: CAN e PROFIBUS

Max Mauro Dias Santos^{*1}, Francisco Vasques² e Marcelo Ricardo Stemmer³

¹Laboratório de Sistemas de Tempo Real, Unileste, Av. Tancredo de A. Neves, 3500, Bairro Universitário, 35170-056, Coronel Fabriciano, Minas Gerais, Brasil. ²Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua dos Braga 4050-123, Porto, Portugal.

³Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: maxmauro@unilestemg.br

RESUMO. Com a grande disponibilidade e o baixo custo atual da tecnologia de redes, a utilização das redes de computadores para interconectar sensores, atuadores e controladores está tornando-se amplamente aceita para a implementação de sistemas de controle realimentado. Tal tipo de implementação, na qual as malhas de controle são fechadas utilizando uma rede de comunicação de tempo real, são chamadas de Sistemas de Controle via Redes (ou NCS, para *Networked Control Systems*). Quando implementamos um NCS, a rede de comunicação subjacente deve fornecer um serviço de comunicação de tempo-real que satisfaça os requisitos das aplicações de controle. Em consequência, é fundamental a avaliação da correção do tempo de resposta da rede de comunicação, quando comparado com os requisitos da aplicação de controle. As redes CAN e PROFIBUS são habitualmente consideradas aceitáveis para suportar NCS de pequena escala, devido a sua capacidade de comunicação de tempo real. No entanto, é também conhecido que a sua correção temporal é altamente dependente das características dos fluxos de mensagens suportados, tais como a sua periodicidade e o comprimento de mensagens relacionado. Neste artigo, comparamos as propriedades temporais das redes de controle CAN e PROFIBUS. Basicamente, avaliamos a sua capacidade para suportar sistemas controlados por computador, através do cálculo do tempo de resposta das mensagens no pior caso. Um pequeno exemplo de um NCS é utilizado para comparar a capacidade dessas redes de controle para satisfazer os requisitos da aplicação de controle suportada.

Palavras-chave: CAN, *Jitter*, PROFIBUS, Sistemas de Controle via Redes.

ABSTRACT. Evaluation of the timing properties of two control networks: CAN and PROFIBUS. Due to the increased availability of low cost network technology, the use of networks to interconnect sensors, actuators and controllers is becoming widely accepted for the implementation of feedback control systems. Such type of feedback implementation, wherein the control loops are closed through a real-time network, are called Network Controlled Systems (NCS). When implementing a NCS, the underlying communication network must provide a timely communication service, which must be the adequate to fulfil the control application requirements. Therefore, the assessment of the network responsiveness to the real-time requirements of the control application is a fundamental issue. Both PROFIBUS and CAN networks are usually considered suitable to support small-scale NCS, due to their real-time capabilities. However, their temporal responsiveness is highly dependent on both the timing characteristics of the supported message streams, such as its periodicity and the related message lengths. In this paper, we compare the timing properties of both CAN and PROFIBUS control networks. Basically, we assess their capability to support Network Controlled Systems, through the evaluation of the related worst-case message's response time. A small example of a NCS is then used to assess the capability of the CAN control network to fulfil control application requirements.

Key words: CAN, *Jitter*, PROFIBUS, Networked Control Systems.

Introdução

As redes Fieldbus estão se tornando amplamente populares em sistemas controlados por computador.

Um sistema Fieldbus permite que dispositivos de campo, como sensores, atuadores e controladores, sejam interconectados a um custo baixo, utilizando

uma quantidade de cablagem menor e requerendo menor manutenção que as conexões ponto-a-ponto. Por outro lado, e não considerando unicamente os aspectos econômicos, o uso de Fieldbus em sistemas controlados por computador é também reforçado pelo aumento da descentralização das tarefas de controle e de medição. Sistemas controlados por computador em que as malhas de controle são fechadas através de uma rede Fieldbus de tempo real são chamadas de Sistemas de Controle via Redes (ou NCS, de *Networked Control Systems*), conforme pode ser visto na Figura 1.

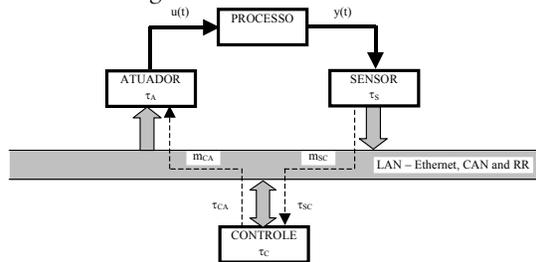


Figura 1. Exemplo de um sistema de controle via rede (NCS).

Diversas redes Fieldbus podem ser usadas para suportar um NCS. A rede CAN (Controller Area Network) (ISO, 1993) foi originalmente projetada para ser utilizada em veículos para resolver os problemas de cablagem que aumentavam com o crescimento do uso de componentes baseados em microprocessadores. CAN está também sendo considerado para ambientes de controle de processos distribuído (Zuberi e Shin, 1997) e está sendo usado como interface de comunicação em arquiteturas proprietárias, tais como DeviceNet (Rockwell, 1997:225), cujo alvo consiste em Sistemas de Controle via Redes (NCS) de pequena escala. Diversos estudos sobre como garantir os requisitos de tempo real de mensagens em redes CAN estão disponíveis (Tindell et al., 1995), os quais fornecem condições de escalabilidade em pre-run-time para análise de requerimentos de tempo do tráfego NCS.

Por outro lado, PROFIBUS (EN 50170, 1996) é um padrão Fieldbus para automação de manufatura e controle de processos. O protocolo MAC PROFIBUS é baseado sobre o procedimento de passagem do bastão pelas estações mestre para garantir o acesso ao barramento a cada nó da rede, e um procedimento mestre-escravo usado pelas estações mestre para comunicarem-se com estações escravo. O procedimento de passagem do bastão utiliza uma versão simplificada do protocolo *timed-token* (Grow, 1982:17). Esse protocolo é baseado sobre a medição do tempo de rotação do bastão, que induz um comportamento temporal bem definido

das mensagens transferidas, desde que a duração do tempo de ciclo seja inferior a um determinado limite superior. Entretanto, ele é capaz de suportar o tráfego de controle relacionado, com tempos de resposta limitado (Tovar e Vasques, 1999).

A utilização de uma rede de controle para interconectar sensores, atuadores e controladores em um sistema de controle realimentado requer que a rede de controle deva ser simultaneamente:

- capaz de suportar fluxos de mensagens periódicas, de forma a transferir dados periódicos relacionados com o controle (por exemplo, dados de leitura periódica de um grupo de sensores);
- capaz de garantir um tempo de resposta com limite superior para transferência de mensagens, de forma a respeitar os atrasos máximos de controle relacionados;
- capaz de garantir um comportamento temporal previsível na presença de carga de rede variável por causa do tráfego não-relacionado à aplicação de controle (alarmes, fluxos de vídeo relacionados com a vigilância de instalações etc).

A rede de comunicação deve fornecer um serviço de tempo real para as aplicações de controle suportadas.

Em adição, um problema bem conhecido quando se utiliza uma rede de comunicação para suportar aplicações de controle é a presença de *jitter*, ou seja, a variabilidade do intervalo de tempo entre transferências consecutivas de mensagens pertencentes a um mesmo fluxo.

Por instância, na hipótese de periodicamente requisitar a transferência do valor de um determinado sensor específico, a transferência atual não será executada imediatamente, pois as mensagens necessitam ser escalonadas para a transmissão em um recurso compartilhado (o meio de comunicação). Como consequência, em alguns ciclos, a mensagem do sensor será transferida mais cedo no período do ciclo e, em outros ciclos, ela será transferida mais tarde. O serviço de tempo real fornecido pela rede de controle deverá garantir que as mensagens do sensor serão sempre transferidas antes das respectivas metas temporais.

O problema do *jitter* pode ser mais acentuado quando a rede de controle é compartilhada entre múltiplas malhas de controle (Figura 2). Nesse caso, uma requisição particular de um sensor para transferência de dados pode ser imediatamente efetuada, caso não haja mais requisição alguma pendente, ou pode ser atrasada no tempo, caso existam requisições múltiplas pendentes para serem

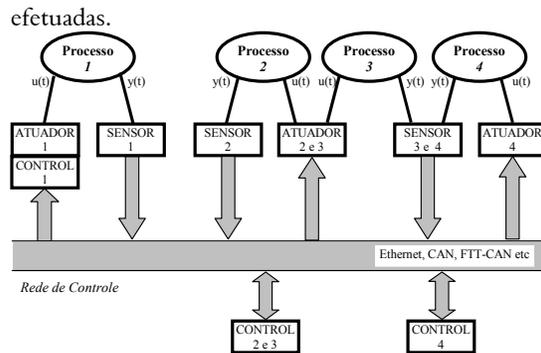


Figura 2. Exemplo de um NCS com diversas malhas de controle.

A estrutura deste artigo é organizada como segue. A Seção 2 descreve as características mais importantes das redes CAN e PROFIBUS. Uma relevância particular é dada aos protocolos MAC delas, pois esses são fundamentais para análise do tempo de resposta realizado na Seção 3. Na Seção 4, o problema de *jitter* é abordado em ambos os casos, de uma simples malha de controle e em múltiplas malhas de controle. Fundamentalmente, caracterizamos o *jitter* em termos de parâmetros de tempo real. Na Seção 5, analisamos os resultados de simulação do comportamento de protocolos CAN e PROFIBUS, para ambos os casos de malhas de controle simples e múltiplas. Finalmente, na Seção 6, são esboçadas as conclusões.

Principais características de protocolos de comunicação CAN e PROFIBUS

Protocolo PROFIBUS

O protocolo MAC PROFIBUS é baseado sobre o procedimento de passagem do bastão usado por estações mestre para garantir acesso ao barramento a cada outra, e um procedimento mestre-escravo usado pelas estações mestre para comunicarem-se com estações-escravo. São definidas duas categorias de mensagens: mensagens de alta prioridade e mensagens de baixa prioridade, que utilizam duas filas de saída independentes.

O procedimento de passagem do bastão PROFIBUS utiliza uma versão simplificada do protocolo PROFIBUS (Grow, 1982:17) para controlar tanto o acesso ao barramento como o tempo de ciclo do bastão. Esse procedimento funciona como a seguir descrevemos.

Cada estação-mestre, depois de receber o bastão, realiza a medição do início do tempo de rotação do bastão. Essa medição expira na próxima chegada do bastão e resulta no tempo de rotação real do bastão (T_{RR}). Um valor comum do tempo de rotação alvo do bastão (T_{TR}) deve ser definido, devendo esse ser

pequeno o suficiente para satisfazer os requisitos de correção de resposta para o sistema global. Quando uma estação recebe o bastão, o temporizador do tempo de retenção do bastão (T_{TH}) é dado pelo valor correspondente pela diferença, se positivo, entre os valores de T_{TR} e de T_{RR} .

Se, à chegada do bastão, este estiver atrasado, ou seja, se o tempo de rotação real do bastão (T_{RR}) for maior que o tempo de rotação alvo do bastão (T_{TR}), a estação-mestre pode transferir, no máximo, uma mensagem de alta prioridade. Caso contrário, a estação-mestre pode transferir mensagens de alta prioridade enquanto $T_{TH} > 0$. As mensagens de baixa prioridade serão transferidas quando não existirem mais mensagens de alta prioridade e enquanto $T_{TH} > 0$.

Um conceito importante no protocolo PROFIBUS é o ciclo de mensagem. Um ciclo de mensagem consiste em uma mensagem de ação do mestre (mensagem de requisição ou envio/requisição) associada a uma mensagem de reconhecimento ou resposta do receptor. O dado de controle pode ser transmitido na mensagem de ação ou na mensagem de resposta.

A seguir, é apresentado o procedimento de passagem do bastão da rede PROFIBUS:

/* initialisation procedure */

At each station K , ($K = 1, 2, \dots, n$):

$T_{TH} \leftarrow 0$;

$T_{RR} \leftarrow 0$;

Release T_{RR} ; /* count-up timer */

/* run time procedure */

At each station K , ($K = 1, 2, \dots, n$), at the Token arrival, DO:

$T_{TH} \leftarrow T_{TR} - T_{RR}$;

$T_{RR} \leftarrow 0$;

Release T_{RR} ; /* count-up timer */

IF $T_{TH} > 0$ THEN

Release T_{TH} ; /* count-down timer */

ENDIF;

IF pending High priority messages

Transfer one High-priority message

ENDIF;

WHILE $T_{TH} > 0$ AND High priority messages DO

Transfer High priority messages

ENDWHILE;

WHILE $T_{TH} > 0$ AND Low priority messages DO

Transfer Low priority messages

ENDWHILE;

Protocolo CAN

O protocolo CAN implementa um barramento baseado em prioridade, com um protocolo MAC do tipo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with*

Collision Avoidance). Nesse protocolo, qualquer estação pode acessar o barramento quando ele estiver ocioso. Entretanto, contrariamente às redes como Ethernet, a resolução da colisão é não-destrutiva, no sentido de que uma das mensagens, sendo transmitidas será bem sucedida.

Existem 4 tipos de mensagens que podem ser transferidas em uma rede CAN. Dois tipos são usados durante a operação normal da rede CAN: a Data Frame, que é usada para transferir dados de uma estação para outra, e a Remote Frame, que é usada para requisitar dados de uma estação distante. As outras 2 mensagens são usadas para sinalizar um estado anormal da rede CAN: a Error Frame sinaliza a existência de um estado de erro e a Overload Frame sinaliza que uma estação particular não está pronta para transmitir dados.

Os sinais do barramento podem ter 2 estados diferentes: bit recessivo e bit dominante (que sempre subescreve o bit recessivo). O mecanismo de resolução da colisão funciona como segue: quando o barramento se torna ocioso, cada estação com mensagens pendentes iniciará a transmissão. Durante a transmissão do campo identificador, se uma estação transmitindo um bit recessivo ler um bit dominante, significa que existia uma colisão com uma mensagem de maior prioridade e, conseqüentemente, essa estação aborta a transmissão da mensagem. A mensagem de maior prioridade sendo transmitida irá prosseguir sem perceber qualquer colisão, e assim será transmitida com sucesso. A mensagem de maior prioridade é a que tiver o maior *leading* bit dominante sobre o campo de identificador. Obviamente, cada fluxo de mensagem deverá ser unicamente identificado. A estação que perder a fase de arbitragem terá automaticamente recuperada a sua transmissão de mensagem.

Análise do tempo de resposta em protocolos CAN e PROFIBUS

Assumimos uma rede com r estações (estações-mestre para o caso PROFIBUS) e n fluxos de mensagens (fluxos de mensagens de alta prioridade para o caso PROFIBUS) definidas como:

$$S_i = (C_i, T_i, D_i) \quad (1)$$

Um fluxo de mensagem é uma seqüência temporal de mensagens relativas à, por exemplo, leitura remota de uma variável de processo específica. Para o caso CAN, um fluxo de mensagem i é caracterizado por um único identificador. C_i é a mais longa de duração da mensagem do fluxo S_i . T_i é a periodicidade da requisição de fluxos S_i , considerado como o intervalo de tempo mínimo

entre duas chegadas consecutivas de requisições para a fila de saída do fluxo S_i . Finalmente, D_i é a meta temporal relativa de uma mensagem, que consiste no intervalo de tempo máximo admissível entre o instante em que a requisição da mensagem é colocada na fila de saída e o instante em que cada mensagem é completamente transmitida.

Adicionalmente, para o caso PROFIBUS, consideramos uma mensagem especial (o bastão), que circula ao longo do anel lógico formado pelos mestres. Denotamos a latência do anel lógico (tempo de fala do bastão, incluindo o atraso de latência do nó, atraso de propagação do meio etc.) como τ .

Análise do tempo de resposta de redes CAN

Em Tindell et al. (1995), os autores apresentaram em detalhes as análises do tempo de resposta de redes CAN, assumindo prioridades fixas para fluxos de mensagens (acesso à rede baseado sobre a prioridade do identificador, assumindo que a cada fluxo de mensagens é atribuído um identificador único na rede) e um modelo de escalonamento não preemptivo (mensagens com menor prioridade sendo transmitidas não serão interrompidas por mensagens de maior prioridade). Considerando tal modelo de escalonamento, os autores adaptaram todas as análises de escalonabilidade existentes para o escalonamento de tarefas (Audsley et al., 1993) para o caso de escalonamento de mensagens sobre uma rede CAN.

O tempo de resposta no pior caso de uma mensagem enfileirada, medida da chegada de requisição da mensagem para a fila de saída para o tempo que a mensagem é completamente transmitida é:

$$R_m = I_m + C_m \quad (2)$$

Para garantir que o sistema seja escalonável, é suficiente verificar se cada mensagem possui um tempo de resposta menor que a sua meta temporal. O termo I_m representa o atraso na fila no pior caso - o maior intervalo de tempo entre colocar a mensagem na fila de saída e iniciar a transmissão da mensagem.

A atribuição de prioridade *Deadline Monotonic* (DM) (Audsley et al., 1993) pode ser diretamente implementada sobre uma rede CAN através do campo de identificação de cada fluxo de mensagem, de acordo com a regra DM. No entanto, o atraso de fila no pior caso de mensagem m é:

$$I_m = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left(\left\lceil \frac{I_m + \tau_{bit}}{T_j} \right\rceil \times C_j \right) \quad (3)$$

em que B_m é o fator de bloqueio no pior caso, que é

igual a maior duração de uma mensagem de menor prioridade, e é dada por:

$$B_m = \max_{\forall k \in lp(m)} \{0, C_k\} \quad (4)$$

O termo $lp(m)$ é o conjunto de fluxo de mensagens com menor prioridade que o fluxo S_m . τ_{bit} é a duração para a transmissão de um bit e $hp(m)$ é o conjunto de fluxos de mensagens no sistema com maior prioridade que o fluxo de mensagens S_m . A equação (2) engloba uma dependência mútua, visto que I_m aparece em ambos os lados da equação. Para a análise dessa dependência mútua, de forma a resolver R_m , I_m deve ser encontrado e vice-versa. A forma mais simples para resolver essa equação é formular uma relação de recorrência (Tovar e Vasques, 1999).

Análise do tempo de resposta de redes PROFIBUS

Em Tovar e Vasques (1999), os autores sugerem duas abordagens diferentes para garantir o comportamento de tempo real do tráfego síncrono em redes PROFIBUS.

Na primeira abordagem - o Perfil de Tráfego de Baixa Prioridade Não-Restrito - os requisitos de tempo real para o tráfego de alta prioridade são satisfeitos independentemente da carga de tráfego de baixa prioridade, desde que o protocolo garanta que mínimo uma mensagem de alta prioridade seja transmitida por visita do bastão.

$$R_i^k = Q^k + C_i^k = n^k \times T_{cycle}^k + C_i^k \quad (5)$$

Análise do Jitter

Em um sistema de controle por computador, os elementos sensor, controlador e atuador são interligados através de uma arquitetura ponto-a-ponto, na qual o algoritmo de controle é implementado em um sistema computacional, ao qual uma amostragem é realizada com intervalos de h_k e a atuação na planta física é feita após o cálculo do sinal de controle com um tempo execução do controle τ_k .

Em um NCS, o atraso entre a amostragem e atuação na planta física é tido como o atraso de controle, τ_k , e compreende a soma de todos os atrasos referentes aos tempos de processamento dos nós e aos tempos de transmissão das mensagens transmitidas entre estes os nós da rede, e dado pôr:

$$\tau_A(k) = \tau_s(k) + \tau_{SC}(k) + \tau_C(k) + \tau_{CA}(k) + \tau_A(k) \quad (6)$$

O nó sensor é do tipo *time-driven* e contém uma tarefa periódica h_k , que executa uma amostra do processo e envia o sinal amostrado na forma de mensagem ao nó controlador. O tempo da atividade computacional de conversão analógico-digital (A/D) é de τ_s .

O nó controlador contém uma tarefa *event-driven* que é ativada quando uma amostra do processo chega na forma de mensagem sob a rede do nó sensor. Essa tarefa compreende o algoritmo de controle, que após executar o sinal de controle envia ao nó atuador uma mensagem com o sinal de controle ao nó atuador que é do tipo *event-driven*. O tempo de execução dessa tarefa é dado por τ_c .

O nó atuador é do tipo *event-driven* e contém uma tarefa ativada por uma mensagem vinda do nó controlador com o sinal de controle, que executa uma conversão digital-analógico (D/A), cujo tempo de comutação é dado por τ_a .

O tempo de transmissão de mensagens entre os nós de um NCS podem variar em função do protocolo de acesso ao meio utilizado, contribuindo, assim, no tempo de computação total do atraso de controle. A mensagem m_{sc} corresponde à transmissão da informação medida no nó sensor e enviada ao nó controlador. A mensagem m_{ca} corresponde à transmissão da informação do sinal do controle gerada pelo nó controlador enviada ao nó atuador.

Um diagrama temporal do NCS e apresentado na Figura 3.

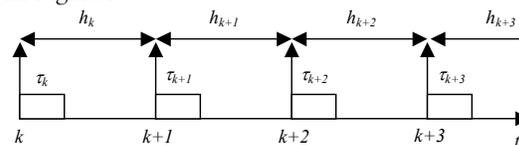


Figura 3. Diagrama temporal de malha de controle sob um NCS.

Os nós sobre a rede induzem a um atraso computacional constante, porém as mensagens m_{sc} e m_{ca} possuem um tempo de transmissão em função das características da rede de comunicação, tais como protocolo de acesso ao meio, taxa de transmissão, prioridades, carga sobre a rede, entre outros.

A essas variações do tempo de transmissão de mensagens, tem-se uma variação no atraso de controle do processo, a qual é definida como o *jitter* de controle. O *jitter* de atraso de controle depende das características da rede de comunicação que conseqüentemente, influencia na estabilidade e performance de um sistema de controle.

Modelo do processo a controlar

Consideremos para efeito de análise do impacto da comunicação sobre a performance de sistemas de controle realimentado, conforme apresentado em [10], no qual o processo a controlar é um servo DC, e o objetivo de controle consiste em fazer com que a posição do servo, $y(t)$, siga um sinal de referência $u(t)$, da melhor forma possível.

A função de transferência contínua no tempo de

um processo servo DC é dada por:

$$G(s) = \frac{1000}{s(s+1)} \quad (7)$$

O algoritmo de controle utilizado é do tipo PD (proporcional mais integral), e para ser implementado em um computador digital deverá ser realizado na forma discreta no tempo, no qual os parâmetros do controlador são escolhidos como $K = 1.5$ e $Td = 0.035$.

Para o projeto do sistema de controle por computador, a regra de *thumb* sugere que o intervalo de amostragem h_k deverá ser escolhido de forma tal que $0,2 < \omega_b \times h_k < 0,6$ (8)

em que ω_b é a largura de banda do sistema em malha fechada. Em fase de projeto foi definido que o sistema em malha fechada possua uma largura de banda dada por, $\omega_b = 80 \text{ rd/s}$, com um intervalo de amostragem de 10-ms. Para que o sistema torne-se estável, o atraso de controle permitido é de da ordem de 10% a 20%.

Experimentação

Para realizar a experimentação, consideraremos uma rede CAN com taxa de transmissão de 10 Mbps, com o algoritmo de controle PD sendo executado no nó controlador e o definindo o intervalo de amostragem de 10-ms, ao qual é definido pelo nó sensor com acionamento do tipo *timed-driven*.

De forma genérica, assumimos duas malhas de controle de motor DC, as quais geram 4 mensagens sobre a rede de comunicação, e um sistema de visão com uma CAMERA-VIDEO que gera 2 fluxos de mensagens, conforme pode ser visto na Figura 4.

Dois esquemas de redes de comunicação serão considerados para análise do *jitter*. As redes CAN e PROFIBUS, possuem protocolos de acesso deterministas porém distintos em seu funcionamento. Em uma primeira fase, assumiremos apenas a rede CAN.

A Tabela 1 apresenta as principais características das mensagens sobre a rede, com diferentes situações de carga.

A cada mensagem é definido o nó de origem, destino, forma de ativação, periodicidade de ativação, T_i , utilização da rede U_i e a prioridade, no caso de uma rede CAN. Três situações, referenciadas como Caso 1, 2 e 3, são analisadas em um NCS com dois motores DC, de forma a mostrarmos o impacto do *jitter* das mensagens m_{sc} e m_{ca} , sob a rede CAN na performance das malhas de controle.

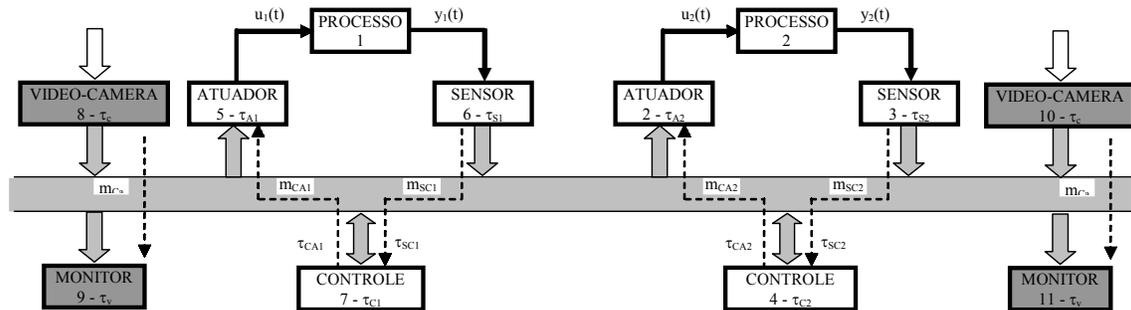


Figura 4. Sistema de controle via redes com duas malhas de controle e uma carga adicional sobre a rede.

Tabela 1. Características das mensagens geradas pelas duas malhas de controle.

Fluxo Mensagens	Tamanho C_i (ms)	Período T_i (ms)	Utilização U_i (%)	Rede CAN- 1 Mbps					
				Caso 1		Caso 2		Caso 3	
				Prioridade	WCRT R_i (ms)	Prioridade	WCRT R_i (ms)	Prioridade	WCRT R_i (ms)
mSC1	0,1	10	1	1	0,2	1	0,2	1	0,2
mSC2	0,1	10	1	2	0,3	3	0,4	5	8,4
mCA1	0,1	10	1	3	0,4	2	0,3	2	0,3
mCA2	0,1	10	1	4	0,5	4	0,5	6	8,5
Fluxo vídeo 1	8x0,1	2	40	5	1,3	5	1,3	3	1,1
Fluxo vídeo 2	10x0,1	3	33,3	6	2,3	6	2,3	4	2,1

Nas Figuras 5, 6 e 7 apresentamos os gráficos dos sinais de referência, resposta, controle e de escalonamento das mensagens sob a rede CAN. O gráfico seguinte apresenta o escalonamento de mensagens e a carga de transmissão sobre a rede. Um sinal alto significa que o nó está pronto para transmitir a mensagem (ou preemptada), enquanto que um sinal baixo significa que o nó não tem nada a transmitir.

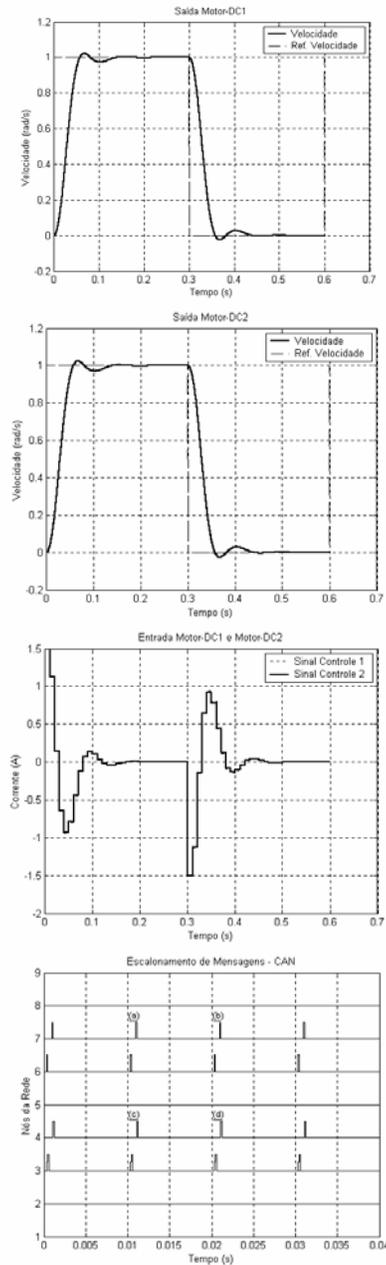


Figura 5. NCS's para o Caso 1.

A Figura 5 apresenta os resultados do Caso 1, na qual tem-se que os motores possuem uma boa performance de operação, visto que os atrasos de transmissão das mensagens m_{sc} e m_{ca} , de ambos os motores, são tidos como constantes, pois a carga de utilização da rede é de 18%, sendo uma carga sobre a rede muito baixa, e os prazos de entrega devem ser periódicos e bem definidos entre a medição e atuação.

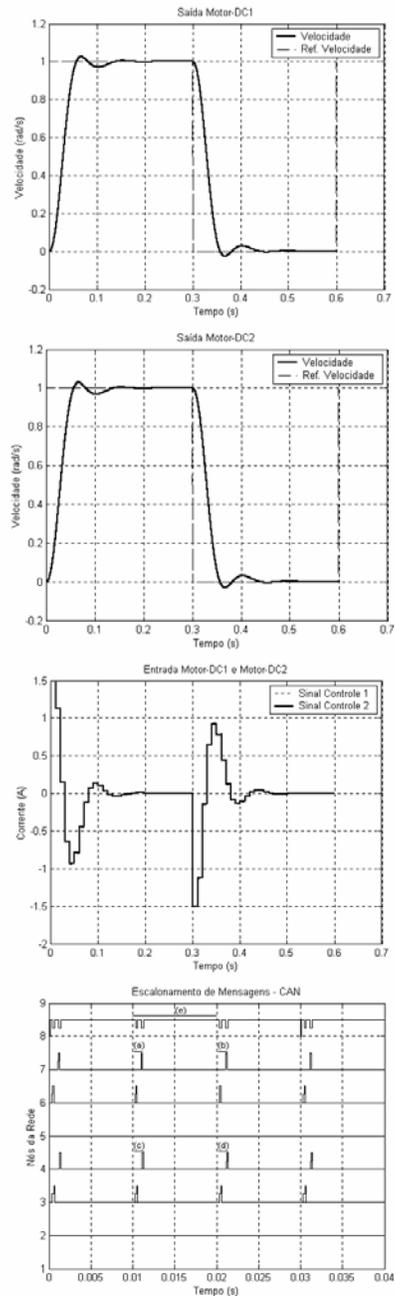


Figura 6. NCS's para o Caso 2.

Na Figura 6 é apresentado os resultados para o Caso 2, no qual tem-se que os motores também possuem uma boa performance de operação, mesmo com uma carga de utilização de rede total em torno de 95%.

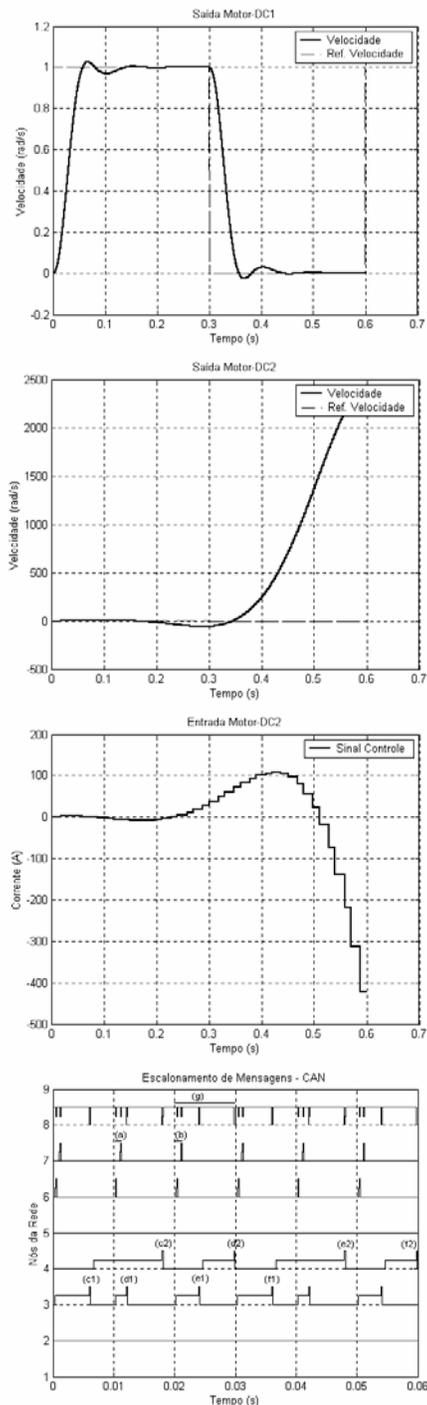


Figura 7. NCS's para o Caso 3.

Os servos motor DC 1 e 2 em momento algum são comprometidos em performance, visto que os atrasos de transmissão das mensagens m_{sc} e m_{ca} , de ambos os motores, são tidos como constantes, conforme pode ser visto no gráfico de escalonamento de mensagens, no qual (a), (b), (c) e (d) representam os tempos de transmissão das mensagens m_{sc} e m_{ca} .

Em (e) é apresentado que o fluxo de mensagens da CAMERA-VIDEO só é preemptado pelas mensagens dos motores DC 1 e 2 porque o protocolo CAN é flexível ao ponto de dar-nos condições de atribuir prioridades de transmissão às mensagens, fazendo com que os servos motor DC 1 e 2 em momento algum sejam comprometidos em performance.

Na Figura 7 que representa o Caso 3, podemos ver que a performance do motor-DC2 é degradada. Isto se deve ao fato de que na rede CAN utilizada as mensagens referentes à malha do motor-DC1 possuem maior prioridade de transmissão e as mensagens referentes à malha do servo DC 2 são de prioridade mais baixa que as mensagens da CAMERA-VIDEO.

Podemos observar que o *jitter* de transmissão das mensagens m_{sc} e m_{ca} , são fatores principais para levar a malha do motor-DC2 à instabilidade. Cada instância de amostragem e atuação é realizada periodicamente em 10-ms. A instância 1 é dada por (c1)(c2), que apresenta um atraso de transmissão das mensagens m_{sc} e m_{ca} , em função da baixa prioridade de transmissão dessas mensagens.

As instâncias subsequentes são dadas por (d1)(d2), (e1)(e2) e (f1)(f2), mostrando que as variações dos atrasos de transmissão das mensagens geram um *jitter* que compromete na performance da malha de controle do motor-DC2.

Em (g) é apresentado que o fluxo de mensagens da CAMERA-VIDEO só é preemptado pelas mensagens do motor-DC1 por ser de prioridade maior, fazendo com que os servo motor- DC1 em momento algum seja comprometido em performance.

Considerações finais

Um dos principais problemas que devem ser considerados em um NCS é o *jitter* da transmissão de mensagens, que gera um *jitter* de medição-atuação. Neste artigo, apresentamos a importância de um protocolo de comunicação MAC determinista, capaz de garantir uma prioridade mais alta às mensagens das malhas de controle mais prioritárias.

Através de simulações, mostramos que a

utilização de rede CAN, com atribuição de prioridades às mensagens, pode garantir uma boa performance de sistemas em malha fechada, mesmo que a rede possua uma altíssima carga de utilização na rede. Demonstramos, também, que o *jitter* das mensagens pode ser contornado através de atribuição de prioridades sob as mensagens corretamente.

Trabalhos futuros estão sendo realizados enfatizando outros protocolos deterministas e seus impactos sobre a performance das malhas de controle em um NCS.

Referências

- AUDSLEY, N. *et al.* Applying new scheduling theory to static priority pre-emptive scheduling. *Softw. Eng. J.*, London, v. 8, n. 5, p. 285-292, 1993.
- EN 50170. General Purpose Field Communication System. Volume 1 - P-NET, Volume 2 - PROFIBUS, Volume 3 - WorldFIP, 1996.
- GROW, R. A timed token protocol for local area networks. In: *Proc. of Electro'82*, Token Access Protocols, Paper 17/3.
- ISO 11898. Road vehicle - interchange of digital information - Controller Rockwell Automation, 1993.
- ROCKWELL. DeviceNet product overview. *Publication DN-2.5*, Rockwell, 1997.
- TINDELL, K. *et al.* Calculating controller area network (CAN) message response time. *Control Eng. Pract.*, Oxford, v. 3, n. 8, p. 1163-1169, 1995.
- TOVAR E.; VASQUES F. Cycle time properties of the PROFIBUS timed token protocol. *Comput. Commun.*, Guildford, v. 22, p. 1206-1216, 1999.
- ZUBERI, K.; SHIN, K. Scheduling messages on controller Area Network for real-time CIM applications. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, New York, v. 13, n. 2, p 310-314, 1997.

Received on May 16, 2003.

Accepted on November 04, 2003.