

UM PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE REDES ETHERNET COMUTADA BASEADA EM UMA MÉTRICA DE QUALIDADE DE CONTROLE

ALIRIO SÁ*, RAIMUNDO MACEDO*, TITO LUÍS MAIA SANTOS†, UBIRAJARA FRANCO MORENO†

**Laboratório de Sistemas Distribuídos (LaSiD), UFBA, Campus Ondina, Salvador, BA*

†*Departamento de Automação e Sistemas (DAS), UFSC, Campus Trindade, Florianópolis, SC*

Emails: aliriosa@ufba.br, macedo@ufba.br, tito@das.ufsc.br, moreno@das.ufsc.br

Abstract— The modern process control industry has adopted computer networks in order to reduce operational costs, improve interoperability and reliability. Nonetheless, such an approach raises new challenges in the design of control systems, due to the varied transmission delays, especially when COTS standard networks, such as the Ethernet are considered. In this paper it is proposed a methodology in order to evaluate the time-varying delay effect in NCS implemented in Switched Ethernet buses. The proposed methodology can be applied to NCS composed by periodic messages. It allows one to evaluate robustness and performance issues throughout a metric known as apparent phase margin.

Keywords— Networked Control Systems, Time-Varying Delay, Switched Ethernet

Resumo— A indústria moderna de controle de processos tem utilizado as redes de computadores para desenvolver soluções com menores custos operacionais, maior interoperabilidade e que sejam mais confiáveis. Entretanto, tais soluções trazem novos desafios ao projeto do sistema de controle, relacionados aos atrasos impostos pela transmissão dos dados, principalmente quando redes de prateleira, como a *Ethernet*, são utilizadas. No presente artigo é proposta uma metodologia de avaliação do impacto do atraso variável em sistemas de controle via redes implementados através de barramentos do tipo *Ethernet* Comutada (EC). A metodologia proposta é aplicável em sistemas de controle via redes formados por mensagens periódicas e permite avaliar aspectos de robustez e desempenho através de uma métrica conhecida como margem de fase aparente.

Palavras-chave— Sistemas de Controle via Redes, Atraso Variável, Ethernet Comutada

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Controle via Redes (NCS, *Networked Control Systems*) permitem que as malhas de controle sejam implementados através de barramentos de redes de comunicação. O compartilhamento do barramento possibilita a redução de custos com cabeamento, a simplificação do *layout* do ambiente industrial, a integração de vários níveis hierárquicos do sistema de informação fabril e torna mais simples os procedimentos de reconfiguração. Notadamente, o uso de um barramento compartilhado promoveu o surgimento de alguns desafios que eram desconsiderados em malhas de controle implementadas com cabeamento dedicado (Yodyium and Chow, 2003; Yang, 2006). Neste contexto, a degradação do desempenho do sistema de controle causada pelo atraso variável induzido pela rede é um dos problemas mais estudados. A fim de quantificar o efeito dessa degradação causada pelo uso de uma rede de comunicação para fins de controle, utiliza-se o conceito de Qualidade de Controle (QoC, *Quality of Control*).

Sabe-se que mesmo as redes do tipo *Ethernet* Comutada (Tanenbaum, 2003) têm características não determinísticas (Decotignie, 2005). No entanto, pode-se limitar o tráfego segundo algumas condições de forma que seja possível determinar o máximo atraso induzido pela rede (Lee and Lee, 2002; Georges et al., 2005). Geralmente, a degradação do desempenho provocada por tais redes é obtida através de um procedimento ana-

lítico, como em (Georges et al., 2006), ou quantificado via experimentação, como em (Lee and Lee, 2002).

No presente artigo será apresentado um procedimento para avaliar a QoC de NCS implementadas em redes do tipo EC. Para tanto, será proposto um procedimento que envolve tanto uma etapa de experimentação via simulação quanto uma etapa analítica que visa quantificar o efeito do atraso variável por meio de uma noção conhecida como *margem de fase aparente* (Cervin et al., 2004). A abordagem analítica, usando a margem de fase aparente combinada com o uso de alguns conceitos de teoria das filas, permite estabelecer os limites para o uso da rede, de modo a guiar o projeto do sistema, encontrar o número de plantas que podem ser controladas e verificar a degradação no desempenho das mesmas.

Em Lee and Lee (2002) discute-se a viabilidade da utilização de estruturas de *Ethernet* Comutada com vistas à implementação de malhas de controle. Nesse trabalho são comparados os resultados obtidos quando redes EC e Compartilhada são utilizadas. Em Marti et al. (2004) utiliza-se uma métrica de QoC baseada no índice de desempenho conhecido como IAE (*Integral of Absolute Error*) a fim de realizar a distribuição da largura de banda da rede, através da determinação dos períodos de amostragem das malhas de controle. Essa métrica de *QoC* está relacionada diretamente com o desempenho, porém não leva em conta a robustez de um sistema sujeito a um atraso variável.

No presente trabalho optou-se por utilizar a margem de fase aparente como métrica de avaliação da QoC em uma rede *Ethernet Comutada* uma vez que esta permite avaliar tanto questões de robustez quanto de desempenho num único índice.

O trabalho será apresentado em cinco seções organizadas como segue: a margem de fase aparente é apresentada na seção 2; na seção 3, discute-se o modelo da rede EC e propõe-se um procedimento para obtenção do pior tempo de resposta, bem como os procedimentos para a análise de NCS sobre EC; na seção 4, são apresentados e discutidos os experimentos realizados e finalmente a conclusão do trabalho é apresentada na última seção.

2 MARGENS DE JITTER E DE FASE APARENTE

A *margem de atraso* (L_m), a *margem de ganho* (g_m) e a *margem de fase* (φ_m) são conceitos da teoria de controle clássico que expressam o grau de incerteza que um dado sistema nominal suporta sem que este se torne instável. Estes conceitos são expressos sob a forma de métricas em termos de variação de atraso, ganho ou fase de um dado processo linear (Franklin et al., 2002). A *margem de fase* e a *margem de atraso* foram concebidas dentro de um universo de sistemas com incertezas paramétricas sujeitos a atrasos constantes. Kao and Lincoln (2004) propuseram um critério de estabilidade para sistemas que possuem atrasos variáveis (ver figura 1), onde L representa uma parcela de atraso constante e J representa uma parcela de atraso variável (*jitter*). Em Cervin et al. (2004), as noções de *margem de jitter* e *margem de fase aparente* são propostas numa tentativa de estender as noções clássicas para sistemas sujeitos a atrasos que variam no tempo.

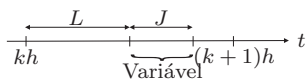


Figura 1: Atraso variável formado por uma parte mínima L e uma variável J .

A *margem de jitter* está fundamentada no critério de estabilidade proposto por Kao and Lincoln (2004) e cuja versão apresentada em (Cervin et al., 2004) é reproduzida a seguir:

Teorema 2.1 (Estabilidade sob jitter) *O sistema de malha fechada da figura 2 é estável para qualquer atraso variante no tempo $\Delta \in [0, N \cdot h]$, em que $N > 0$ é um número real e h é o período de amostragem, se*

$$\left| \frac{P_{alias}(\omega)K(e^{j\omega})}{1 + P_{ZOH}(e^{j\omega})K(e^{j\omega})} \right| < \frac{1}{\tilde{N}|e^{j\omega} - 1|}, \forall \omega \in [0, \pi], \quad (1)$$

onde $\tilde{N} = \sqrt{[N]^2 + 2[N]g + g}$, g é a parte fracionária de N , $g = N - [N]$, $P_{ZOH}(z)$ é a discre-

tização com o sustentador de ordem zero de $P(s)$ e $P_{alias}(\omega)$ é dado por:

$$P_{alias}(\omega) = \sqrt{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| P\left(j(\omega + 2\pi k)\frac{1}{h}\right) \right|^2} \quad (2)$$

A prova deste teorema é apresentada em (Kao and Lincoln, 2004).

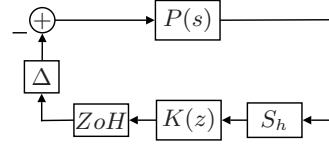


Figura 2: Malha de Controle Formada por: uma Planta Contínua $P(s)$, um Amostrador Sh , um Controlador Discreto $K(z)$, um Sustentador de Ordem Zero ZoH e um Atraso Variável Δ

Definição 2.2 (Margem de Jitter) *Dado o sistema da figura 2, a margem de jitter ($\hat{J}_m(L)$) é definida como o maior valor para o qual a estabilidade de malha fechada é garantida para qualquer atraso $\Delta \in [L, L + \hat{J}_m(L)]$.*

É importante lembrar que a garantia da estabilidade nominal não é uma condição de projeto satisfatória uma vez que os sistemas reais estão sujeitos a incertezas de modelagem. Assim, faz-se necessário projetar sistemas com alguma margem de forma que eles não sejam afetados significativamente por perturbações ou erros de modelagem. A margem de fase aparente $\hat{\varphi}_m$ é uma proposta que tenta contemplar o fenômeno do atraso variável.

Definição 2.3 (Margem de Fase Aparente) *Dado o sistema da figura 2 e assumindo que são conhecidos L e J . A margem de fase aparente é definida como o maior valor de $\hat{\varphi}$ para o qual a estabilidade é garantida para qualquer atraso $\Delta \in [L + \hat{\varphi}/\omega_c, L + \hat{\varphi}/\omega_c + J]$.*

$$QoC = \hat{\varphi}/\varphi \quad (3)$$

Esta relação de degradação será como métrica de QoC uma vez que este índice guarda relação tanto com aspectos de robustez quanto de desempenho, no entanto ainda não foi discutida a sua aplicação em redes do tipo EC.

3 NCS SOBRE EC

3.1 Redes Ethernet Comutadas

Nos últimos anos vêm sendo dada uma atenção crescente ao uso de redes EC para a implementação de malhas de controle (Lian et al., 2001; Lee and Lee, 2002; Georges et al., 2006). No entanto, sabe-se que esse tipo de rede não é determinística

(Decotignie, 2005). A fim de garantir o determinismo temporal, neste tipo de rede, faz-se necessário garantir que o tráfego a que ela será submetida respeite alguns limites (Lee and Lee, 2002).

O atraso induzido pela rede EC deve-se tanto à transmissão do dado pelo meio físico quanto aos processos que ocorrem devido ao uso do *Switch*. O atraso no *Switch* pode variar não só de acordo com as estratégias de comutação utilizadas, mas também com sua taxa nominal de comutação.

O máximo atraso fim-a-fim pode ser calculado através da teoria *Network Calculus* para sistemas sujeito a padrões de tráfego periódicos e esporádicos. No entanto, o valor do atraso fim-a-fim calculado apresenta um nível de conservadorismo que pode ser evitado caso a estrutura de rede seja submetida apenas a tráfegos de padrões periódicos.

3.2 Atrasos no Laço de Controle

O atraso de atuação em um laço de controle, denotado por R_{loop} , pode ser definido como o intervalo entre a amostragem e a execução da ação de controle sobre a planta. Sendo assim, em um NCS, tal atraso pode ser calculado da seguinte forma:

$$R_{loop} = R_{sns} + D(sns, ctrl) + R_{ctrl} + D(ctrl, atd) + R_{atr} \quad (4)$$

Em que R_{sns} , $D(sns, ctrl)$, R_{ctrl} , $D(ctrl, atd)$, R_{atr} representam, respectivamente, o tempo de resposta da tarefa de sensoriamento no sensor, o atraso de comunicação entre o sensor e controlador, o tempo de resposta da tarefa de controle no controlador, o atraso de comunicação entre controlador e atuador e o tempo de resposta da tarefa de atuação no atuador (ver figura 3).

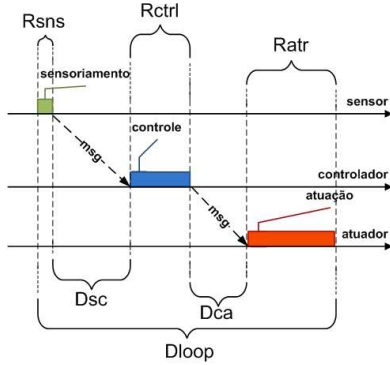


Figura 3: Atrasos em Controle via Rede

R_{sns} , R_{ctrl} e R_{atr} podem ser obtidos através de estratégias tradicionais de análise de tempo de resposta em sistemas de tempo real (Cheng, 2002). $D(sns, ctrl)$ e $D(ctrl, atd)$, por outro lado, dependerão das características da rede de comunicação.

3.3 Atrasos de Comunicação

Em uma rede EC, quando uma mensagem é transmitida, a mesma é empacotada em um quadro *Ethernet* e encaminhada para o *buffer* de entrada

do *Switch*. A figura 4 apresenta o modelo em filas representando a arquitetura interna de um *Switch*.

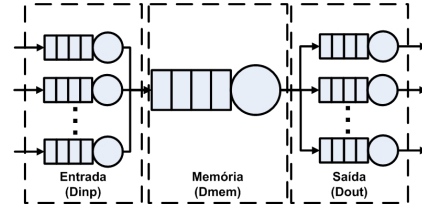


Figura 4: Modelo em Rede de Filas do Switch

Com isso, sendo C_x a capacidade de transferência do *buffer* (em bits por segundo) e S_{msg} o tamanho (em bits) do maior quadro *Ethernet* transmitido pelos dispositivos do sistema de controle, a velocidade de atendimento (μ_x) em quadros por segundo (*qps*), será: $\mu_x = \frac{C_x}{S_{msg}}$.

Assumindo fluxos periódicos, a taxa total de quadros (λ_x) que chegam um *buffer* x do *Switch* será o somatório N_x de todos os quadros, que são encaminhadas por dispositivos (ou *buffers*) a tal *buffer* (em um cenário de pior caso) dentro de um intervalo de observação T , assim: $\lambda_x = \frac{N_x}{T}$.

É necessário que $\lambda_x < \mu_x$ para que a capacidade do *buffer* não seja comprometida, ocasionando estouro de *buffer* ou perda de mensagens. Então, através da lei de *Little* (Cooper, 1981) é possível derivar o tempo de resposta (D_x) de um quadro através um *buffer* x : $D_x = \frac{N_x}{\mu_x}$.

Assim, assumindo o modelo apresentado na figura 4, o atraso $D(i, j)$ observado na transmissão de uma mensagem do dispositivo i para um dispositivo j será:

$$D(i, j) = D_{inp}(i) + D_{mem} + D_{out}(j) \quad (5)$$

$D_{inp}(i)$, D_{mem} e $D_{out}(j)$ representam respectivamente o atraso do quadro no *buffer* de entrada i (associado ao transmissor), o atraso no processo de comutação (associada a memória compartilhada do *Switch*) e o atraso no *buffer* de saída j (associado ao receptor da mensagem).

O fluxo máximo de mensagens ocorre ciclicamente dentro de um determinado intervalo de tempo, dito hiper-período ou executivo cíclico, que corresponde ao mínimo múltiplo comum (*mmc*) de todos os períodos dos nós transmissores que integram a rede. Uma análise de pior caso do atraso fim-a-fim deve ser feita assumindo o intervalo de observação T dentro do hiper-período.

3.4 Estabilidade em NCS sobre EC

Para garantir a estabilidade do sistema é suficiente atender a seguinte condição:

$$R_{loop}^{max} \leq J_m(R_{loop}^{min} + \frac{\hat{\varphi}_m}{\omega_c}) + R_{loop}^{min} \quad (6)$$

R_{loop}^{min} e R_{loop}^{max} representam os atrasos mínimo e máximo na atuação em um laço de controle. O R_{loop}^{min} é inteiramente dependente da configuração. Por exemplo, em um NCS em que os dispositivos sensor, controlador e atuador se comunicam através da rede. O melhor caso para o atraso na atuação em um laço de controle pode ser obtido quando os tempos de computação no melhor caso são observados nos dispositivos e não há interferência de comunicação interna ou externa no sistema. As interferências de comunicação externas ocorrem quando mensagens de outros sistemas interferem na transmissão das mensagens do sistema analisado. Interferências internas acontecem quando mensagem de rodadas anteriores do laço de controle interferem na transmissão de mensagens de rodadas subsequentes. O R_{loop}^{max} se verifica quando os tempos de computação no pior caso são observados nos dispositivos e existem interferências internas e externas de comunicação.

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

4.1 Modelo de Sistema

Considera-se um modelo de sistema em que os dispositivos sensor, controlador e atuador se comunicam através de uma rede EC. O *Switch* é não bloqueante, assim o atraso de comutação é desprezível. Por outro lado, os *buffers* de entrada e saída do *Switch* são simétricos e os atrasos em tais *buffers* são determinados pelas velocidades das portas. Os dispositivos são dotados de capacidade de processamento e, além disso, utilizam um sistema operacional de tempo real, o qual escalona as tarefas seguindo uma política baseada em prioridades fixas. A tarefa τ_{sns} executada no sensor é ativada periodicamente a cada h unidades de tempo. A tarefa τ_{ctrl} , por sua vez, é executada no controlador e ativada após o recebimento da informação do estado da planta, sendo enviada pela tarefa τ_{sns} . Então, na tarefa τ_{ctrl} , a ação de controle é enviada ao atuador. Por fim, a tarefa τ_{atd} é executada toda vez que a ação de controle é recebida. Assume-se a existência de n plantas, cujas tarefas de controle são implementadas em um único nó na rede.

4.2 Parâmetros, Fatores e Métricas

Nas simulações e análises a serem apresentadas foram utilizados as plantas e os controladores da tabela 1. Na tabela, as propriedades temporais, de cada uma das tarefas, são representadas pelo tempo de computação no pior caso (*WCET*) e pelo período de amostragem (h).

Para avaliação de desempenho são assumidos os seguintes parâmetros e fatores: i) velocidade da rede (10, 100 e 1000 *Mbps*); ii) modelo de comutação usada no *Switch* (*store-and-forward*); iii) tamanho do *buffer* de mensagens (10000 quadros);

iv) estratégia em caso de estouro de *buffer* (descarte de quadros); v) tamanho dos quadros (576 *bytes*); vi) Número de plantas ($n = 1$ a $n = 30$).

Durante as avaliações será observada a qualidade do controle, através do uso da margem de fase aparente. Tal métrica será correlacionada com o número de dispositivos que competem pelo uso da rede. Além disso, serão apresentados o comportamento do atraso de comunicação e computação em função do aumento no número de dispositivos na rede. Os dados que serão apresentados foram todos obtidos em cenários de pior caso (hiper-período), o qual se verifica no *mmc* entre 0.68, 0.69 e 0.65 *ms*.

4.3 Resultados de Simulação

No primeiro experimento, realizado através de simulações, correlaciona-se o atraso em função do número de dispositivos do sistema. Em tal experimento, são utilizados de $n = 1$ a $n = 30$ plantas compartilhando a rede (figura 5).

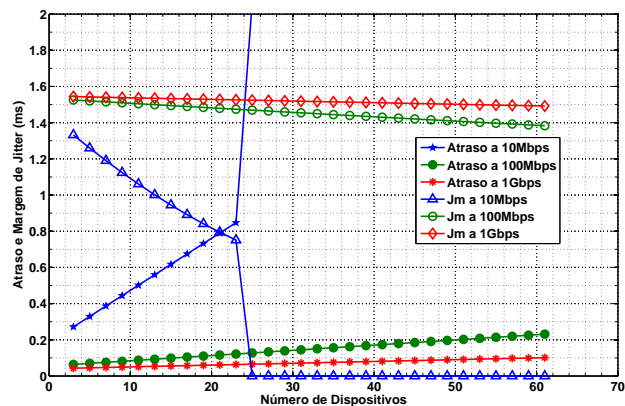


Figura 5: J_m do Sistema e Atraso de Total

Na figura 5 pode-se perceber o comportamento do atraso e da margem de jitter do sistema em função do aumento do número de dispositivos do sistema. Para taxas nominais de transferência de 10 *Mbps* a medida que o número de dispositivos aumenta, o atraso na malha de controle aumenta exponencialmente, enquanto a *margem de jitter* decai na mesma proporção. Para taxas de 100 e 1000 *Mbps*, por outro lado, o atraso na malha de controle e as *margens de jitter* do sistema são menos sensíveis ao aumento do número de dispositivos que compartilham a rede.

As figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, o comportamento dos atrasos de comunicação e de computação em função do número de dispositivos. Correlacionando essas figuras com a figura 5, é possível perceber que o atraso na comunicação é o componente principal do atraso na malha de controle (para a configuração de sistema proposta). Enquanto o atraso de comunicação varia

Tabela 1: Propriedades temporais das tarefas do sistema.

Planta	Controlador	Tarefa	h	$WCET$
$P_1(s) = \frac{-1064}{(s-36.16)(s+36.16)}$	$K_1(z) = \frac{-220.5z^2+417z-197.1}{z^2-1.567z+0.567}$	τ_{sns}	680	13
		τ_{ctrl}	-	1
		τ_{atd}	-	27
$P_2(s) = \frac{4 \cdot 10^4}{(s-200)(s+200)}$	$K_2(z) = \frac{27.16z^3-33.5z^2+9.869z-0.725}{z^3-0.0845z^2-0.0704z+0.0671}$	τ_{sns}	690	14
		τ_{ctrl}	-	1
		τ_{atd}	-	28
$P_3(s) = \frac{5 \cdot 10^7}{s(s^2+100s+2.5 \cdot 10^5)}$	$K_3(z) = \frac{7.624z^4-15.93z^3+10.52z^2-1.85z+0.0028}{z^4+0.7321z^3+0.2844z^2-0.1446z+0.0174}$	τ_{sns}	650	12
		τ_{ctrl}	-	1
		τ_{atd}	-	24

em décimos de milissegundos, o atraso de computação varia em frações de centésimos de ms .

Um efeito interessante pode ser observado quando a taxa nominal de comunicação é elevada ($1Gbps$). Para taxas de comunicação de $10Mbps$ e $100Mbps$ a disputa pelo acesso ao meio faz com que as mensagens de sensoriamento cheguem ao controlador espaçadas entre $5.76\mu s$ (para taxas de $100Mbps$) e $57.6\mu s$ (para taxas de $10Mbps$). Isso provoca um maior espaçamento entre as ativações das tarefas de controle no controlador. Para $1Gbps$ por outro lado, o tempo de propagação das mensagens na rede é de apenas $0.576\mu s$, o que diminui o espaçamento entre as ativações das tarefas no controlador e faz com que haja uma disputa maior das tarefas pelo uso da capacidade de processamento de tal dispositivo.

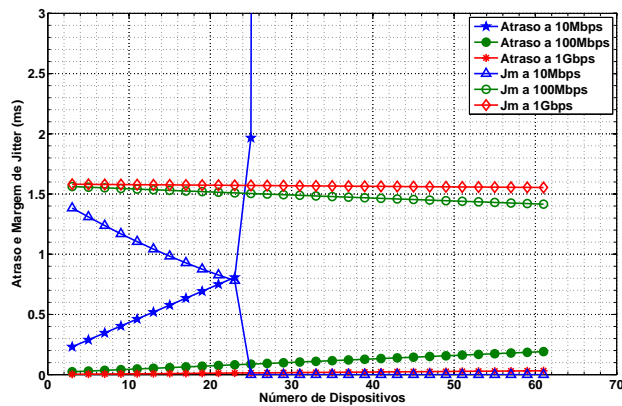


Figura 6: J_m do Sistema e Atraso na Comunicação

Por fim, observou-se o efeito do aumento do tráfego da rede EC na qualidade do controle. Os resultados de tal experimento são apresentados na figura 7. Associando-se essa figura com a figura 5, é possível perceber que à medida que o tráfego na rede aumenta a qualidade do controle diminui, tal efeito é menos severo à medida em que a taxa nominal de transferência da rede aumenta.

Em todos os experimentos, as plantas se mantiveram estáveis, salvo para aqueles experimentos que foram realizados com taxas nominais de $10Mbps$ e o número de dispositivos é superior a 23 (ver figura 8). É possível perceber que quando o controle é instável, a qualidade do desempenho do

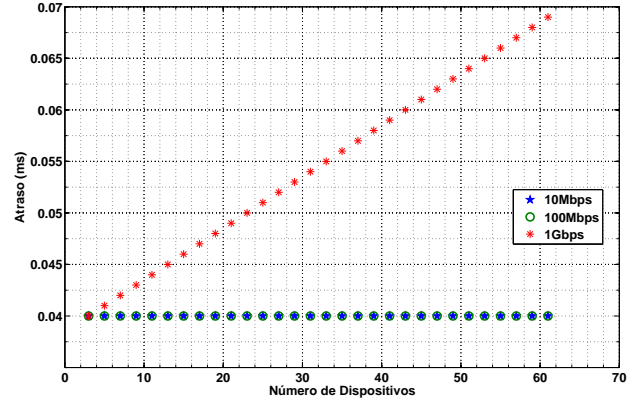


Figura 7: Atraso de Computação

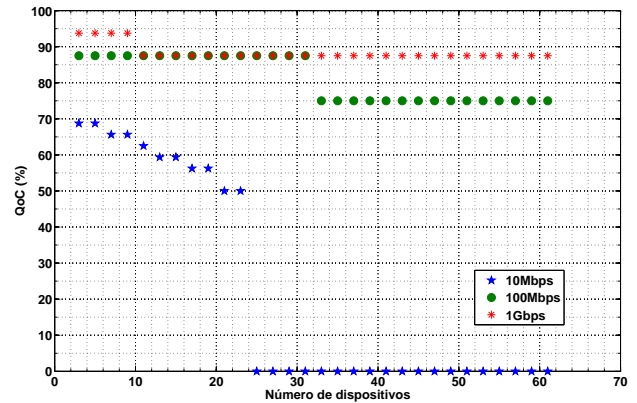


Figura 8: Impacto na QoC

sistema é zero. É interessante observar que a QoC calculada em função da margem de fase aparente varia de forma discreta em função do aumento do número de dispositivos.

4.4 Abordagem Analítica

Através da estratégia proposta na seção 3.4, é possível prever os mesmos resultados obtidos na seção de simulação. Para exemplo, para o cenário em que as portas do switch possui $10Mbps$ ($\mu_{inp} = \frac{10 \cdot 10^6}{576} fps$) e com uma configuração em que a rede é compartilhada por 11 plantas, pode-se realizar a seguinte análise. No instante crítico, cada sensor envia uma mensagem ao con-

trolador, assim o atraso associado a cada entrada do *Switch* no qual cada sensor está ligado será $D_{inp}(sns) = \frac{576}{10 \cdot 10^6} = 0.0576ms$. Na saída do *Switch* para o controlador, por sua vez, tem-se $D_{out}(ctrl) = \frac{576}{10 \cdot 10^6} * 11 = 0.6336ms$. Das mensagens que chegam ao controlador, cada uma é encaminhada ao atuador de sua respectiva planta, assim $D_{inp}(ctrl) = D_{out}(atd) = 0.0576ms$. O atraso na comunicação é dado por $D(sns, ctrl) + D(ctrl, atd) = 3 * 0.0576 + 0.6336 = 0.8064ms$. Observe que em um cenário como esse, no melhor caso, os quadros dos diversos dispositivos chegam no controlador espaçados de $0.0576ms$. Portanto, verifica-se que não existe interferência entre as tarefas de controle, uma vez que o tempo de computação no pior caso das tarefas de controle são iguais a $1\mu s$. O atraso máximo na malha de controle para esse caso será $R_{loop}^{max} = R_{sns} + R_{ctrl} + R_{atd} + 0.8064ms$ e para a malha $P_1(s)K_1(z)$, o atraso máximo será $R_{loop}^{max} = 0.8064ms + 0.041ms = 0.8474ms$.

Através dessa abordagem combinada com a margem de fase aparente é possível estabelecer os limites para o número de plantas no sistema: 128 e 1302 para as taxas nominais de $100Mbps$ e $1Gbps$, respectivamente, considerando as configurações apresentadas.

5 Conclusão

Neste artigo foi proposto um procedimento para avaliação do impacto causado pela implementação de malhas de controle através de redes do tipo EC por meio de uma métrica conhecida como margem de fase aparente. A técnica de avaliação proposta é composta de uma etapa de simulação na qual deve-se obter o maior atraso fim-a-fim e de uma etapa analítica através da qual torna-se possível avaliar o impacto do atraso induzido pela rede. Simulações foram realizadas de maneira a ilustrar a aplicação do procedimento proposto, bem como discutir os efeitos advindos do compartilhamento de uma estrutura de rede EC. Por fim, a partir das simulações foi possível discutir a importância da determinação adequada da taxa de transmissão e do número de nós que virão a compor um NCS implementados em redes do tipo EC.

Referências

- Cervin, A., Lincoln, B., Eker, J., Årzén, K.-E. and Buttazzo, G. (2004). The jitter margin and its application in the design of real-time control systems, *Proc. of the 10th Intern. Conf. on Real-Time and Embedded Computing Systems and Applications*, Göteborg, Sweden.
- Cheng, A. M. K. (2002). *Real-Time Systems Scheduling, Analysis, and Verification*, Wiley-Interscience, USA.
- Cooper, R. (1981). *Introduction to queueing theory*, 2nd edn, North Holland, USA, New York.
- Decotignie, J.-D. (2005). Ethernet-based real-time and industrial communications, *Proceedings of the IEEE* **96**(6): 1102–1117.
- Franklin, G., Powell, D. and Emami-Naeini, A. (2002). *Feedback Control of Dynamic Systems*, 4th edn, Prentice Hall.
- Georges, J.-P., Divoux, T. and Rondeau, E. (2005). Validation of the network calculus approach for the performance evaluation of switched ethernet based industrial communications, *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic.
- Georges, J.-P., Vatanski, N., Rondeau, E. and Jounela, S.-L. J. (2006). Use of upper bound delay estimate in stability analysis and robust control compensation in networked control systems, *12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, St-Etienne, France.
- Kao, C.-Y. and Lincoln, B. (2004). Simple stability criteria for systems with time-varying delays, *Automatica* **40**(8): 1429–1434.
- Lee, K. C. and Lee, S. (2002). Performance evaluation of switched ethernet for real-time industrial communication, *Computers Standards & Interface* **24**(5): 411–423.
- Lian, F.-L., Moyne, J. and Tilbury, D. (2001). Performance evaluation of control networks, *IEEE Control Systems Magazine* **21**: 66–83.
- Marti, P., Yopez, J., Velasco, M., Villa, R. and Fuertes, J. M. (2004). Managing quality-of-control in network-based control systems by controller and message scheduling co-design, *IEEE Transaction on Industrial Electronics* **51**(6): 1150–1167.
- Tanenbaum, A. S. (2003). *Computer Networks*, 4th edn, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, USA.
- Yang, T. C. (2006). Networked control system: a brief survey, *IEE Proc.-Control Theory Appl.* **153**(4): 403–412.
- Yodyium, T. and Chow, M.-Y. (2003). Control methodologies in networked control systems, *Control Engineering Practice* **11**: 1099–1111.