



FERRAMENTAS DE ANÁLISE, SIMULAÇÃO E PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDES: UMA REVISÃO

Eduardo Paciência Godoy, epgodoy@yahoo.com.br¹

Ricardo Yassushi Inamasu, ricardo@cnpdia.embrapa.br²

Arthur José Vieira Porto, ajvporto@sc.usp.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, USP
Avenida Trabalhador São Carlense, 400 CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo

² EMBRAPA Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1452 CEP 13560-970, São Carlos, São Paulo

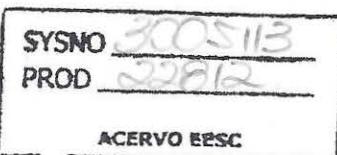
Resumo: A introdução de arquiteturas de redes industriais em barramento ou fieldbus podem melhorar a eficiência e a confiabilidade do sistema de controle como um todo, reduzindo tempo e custos de instalação e manutenção. Aplicações recentes desse tipo de sistema demonstram o surgimento de uma nova abordagem para a utilização de redes industriais, como o CAN (Controller Area Network). Nessa abordagem, o controlador e a planta ficam fisicamente separados e são conectados através de uma rede de comunicação. Este tipo de implementação, onde as malhas de controle são fechadas sob uma rede industrial tem sido denominada de Sistema de Controle via Redes (NCS - Networked Control System). Os principais desafios relacionados ao desenvolvimento de um NCS são os efeitos degenerativos causados pela inclusão da rede de comunicação no sistema de controle. O desempenho e a estabilidade do NCS são deteriorados pela presença dos atrasos de comunicação (delay) entre os sensores, atuadores e controladores do sistema de controle. Buscando minimizar esses efeitos, ferramentas de suporte ao projeto destes sistemas têm sido desenvolvidas visando auxiliar o projetista no estudo da influência de características da rede no desempenho do sistema de controle, na simulação de operação e na otimização de parâmetros de controle do sistema projetado. Sob este contexto e diante da necessidade de se difundir a pesquisa sobre NCS no meio acadêmico brasileiro, este trabalho apresenta uma revisão sobre o desenvolvimento e a utilização de ferramentas de análise, simulação e projeto de NCS, com enfoque no protocolo CAN. Um levantamento de características, requisitos de software, vantagens e usabilidade de diversas ferramentas é realizado. Busca-se a partir da sistematização das informações deste trabalho, gerar uma documentação de referência para orientar trabalhos de pesquisa e desenvolvimento sob o tema.

Palavras-chave: Sistemas de controle via redes - NCS, ferramentas de desenvolvimento, atrasos de comunicação.

1. INTRODUÇÃO

As arquiteturas tradicionais de comunicação e controle ponto-a-ponto, implementadas nos sistemas de manufatura industriais nos últimos tempos, são compostas por cabeamento conectando o computador ou dispositivo central de controle a cada sensor e atuador do sistema. Este tipo de controle tradicional e centralizado, no entanto não fornece os novos requisitos de desenvolvimento de sistemas de controle como modularidade, controle descentralizado, facilidade de diagnóstico e baixo custo (Yang, 2006). Nos sistemas de manufatura atuais, a introdução de arquiteturas de redes baseadas em barramento ou fieldbus podem melhorar a eficiência, a flexibilidade e a confiabilidade do sistema, reduzindo o tempo e os custos de instalação e manutenção (Moyn e Tilbury, 2007). Essa tecnologia de redes industriais, com suas vantagens, foi rapidamente absorvida para satisfazer as necessidades de comunicação entre sistemas e equipamentos aplicados em automação e controle (Hou et al, 2004).

No entanto, desenvolvimentos recentes nesse tipo de sistema de controle distribuído, onde sensores, atuadores e controladores são interconectados através de uma rede de comunicação, demonstram o surgimento de uma nova abordagem para a utilização de redes industriais. Nessa nova abordagem, o controlador e a planta ficam fisicamente alocados em locais separados e são conectados diretamente por uma rede de comunicação formando uma malha de controle remota. O sinal de controle é enviado para o atuador através de uma mensagem encaminhada via rede, enquanto o sensor amostra a saída da planta e retorna a informação para o controlador também transmitindo a informação através da rede. Este tipo de implementação em sistemas industriais, onde as malhas de controle são fechadas sob uma rede de comunicação, como mostrado na Fig. (1), tem sido denominada de Sistema de Controle via Redes (NCS - Networked Control System) (Yang, 2006).



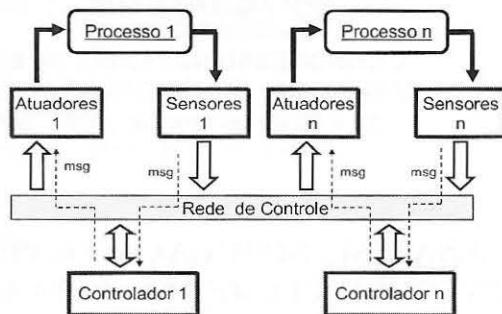


Figura 1. Estrutura de um Sistema de Controle via Redes

Nos NCS, os dispositivos conectados têm que compartilhar da melhor maneira possível o meio disponível para a troca de informações e ainda cumprir com requisitos temporais de transmissão de dados. Como solução para este problema, diversos protocolos de comunicação para NCS têm sido pesquisados e desenvolvidos (Moyne e Tilbury, 2007) como o Profibus, Foundation Fieldbus, Modbus e CAN. O *Controller Area Network* ou CAN (Bosch, 2006) é um protocolo de comunicação digital serial, onde a comunicação de dados é baseada em mensagens com acesso a rede definida por prioridades. O CAN foi originalmente desenvolvido para aplicações na área automotiva, e diante de grande difusão e aceitação (Johansson, Torngren e Nielsen, 2005), acabou sendo utilizado em muitas outras aplicações industriais de controle (Othman et al, 2006). A importância da pesquisa e desenvolvimento de NCS baseados no protocolo CAN pode ser demonstrada por trabalhos recentes como Xia, Wang e Sun (2004), Frutos et al (2006), Gaid et al (2006) e Godoy et al (2007).

Não importando o tipo de protocolo de comunicação utilizado, o desempenho e a estabilidade de um NCS sempre são afetados pela presença de atrasos de comunicação (*delay*) entre os sensores, atuadores e controladores do sistema (Baillieul e Antsaklis, 2007). Esses atrasos de comunicação são resultados do compartilhamento do meio de comunicação com outras malhas de controle como também do tempo de processamento requerido para codificação dos sinais e computação dos dados (Lian et al, 2002).

As pesquisas atuais em NCS têm focado principalmente duas linhas de trabalho. Uma relacionada com a análise da influência dos atrasos de comunicação no desempenho e estabilidade do sistema, bem como o desenvolvimento de ferramentas para simulação desses sistemas (Cervin, Ohlin e Henriksson, 2007; Torngren et al, 2006). E outra no desenvolvimento de metodologias de projeto e controle de NCS para compensar os efeitos dos atrasos melhorando o desempenho e garantindo a estabilidade do sistema (Zhang, Branicky e Phillips, 2001; Tipsuwan e Chow, 2003; Hespanha, Naghshtabrizi e Xu, 2007).

Uma das principais dificuldades relacionadas ao projeto e utilização de NCS é o desenvolvimento de modelos e ferramentas de análise para estudar a influência de parâmetros de configuração no desempenho do sistema e simular seu comportamento e operação (Cervin et al, 2003). Esse fato tem motivado o desenvolvimento de vários trabalhos relacionados a modelos e ferramentas para diferentes tipos de redes e protocolos de comunicação (Torngren et al, 2006).

Sob este contexto e diante da necessidade de se difundir a pesquisa e o desenvolvimento da tecnologia de NCS no meio acadêmico e industrial brasileiro, este trabalho apresenta uma revisão sobre o desenvolvimento e a utilização de ferramentas de análise, simulação e projeto de NCS. Um enfoque principal é direcionado para as ferramentas que possibilitem a pesquisa de NCS com protocolo CAN, entre outros.

2. REVISÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDES - NCS

2.1. Estruturas de NCS

De acordo com Tipsuwan e Chow (2003), os NCS podem ser classificados em dois grupos: estrutura direta e estrutura hierárquica. Na estrutura direta, mostrada na Fig. (2), o controlador e a planta ficam fisicamente alocados em locais separados e são conectados diretamente por uma rede de comunicação formando uma malha de controle remota. O sinal de controle é enviado para o atuador através de uma mensagem encaminhada via rede, enquanto o sensor amostra a saída da planta e retorna a informação para o controlador também transmitindo a informação através da rede.

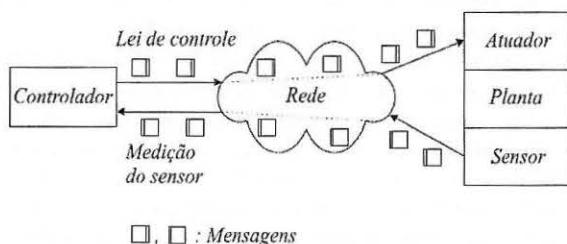


Figura 2. NCS com Estrutura Direta (Modificado de Tipsuwan e Chow, 2003)

Já a estrutura hierárquica, mostrada na Fig. (3), consiste de um controlador principal e um sistema de controle em malha fechada remoto. Periodicamente, o controlador principal calcula e envia uma mensagem com o sinal de referência através da rede para o sistema remoto. O sistema remoto processa o sinal de referência e executa localmente o controle em malha fechada.

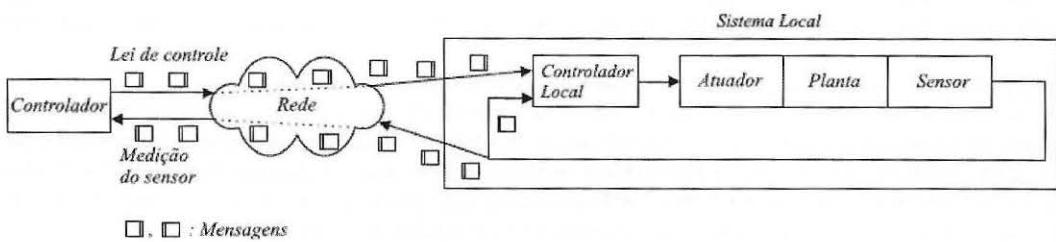


Figura 3. NCS com Estrutura Hierárquica (Modificado de Tipsuwan e Chow, 2003)

Segundo Perez (2006), os critérios para escolha de uma das duas estruturas para o desenvolvimento de NCS dependem das restrições de projeto e das preferências do projetista. Normalmente, NCS que utilizam a Internet utilizam a estrutura hierárquica, pelo fato do tempo de transmissão das mensagens variarem consideravelmente e sua estimativa ser consideravelmente difícil. Já NCS implementados através de redes industriais ou locais, utilizam a estrutura direta, por possuírem tempos de transmissão menores e tempos de resposta mais previsíveis.

2.2. Composição dos Atrasos de Comunicação em NCS

A troca de informações pela rede de comunicação, entre as ECUs (*electronic control unit* - unidade de controle eletrônico) dos dispositivos componentes de um NCS acaba induzindo atrasos de comunicação na transmissão das mensagens. Esse atraso de comunicação entre a transmissão de mensagens em um NCS apresenta a seguinte composição (So, 2003):

- ✓ Tempo de espera: atraso relacionado com a espera da ECU pela disponibilidade da rede para transmissão de mensagens;
- ✓ Tempo de processamento: atraso relacionado com o tempo de processamento (codificação e decodificação) dos pacotes de dados ou mensagens na rede pelas ECUs;
- ✓ Propagação: atraso relacionado ao tempo de transmissão das mensagens na rede industrial.

A Figura 4 mostra um exemplo dos atrasos encontrados em uma transmissão de mensagem por uma rede de comunicação industrial, desde sua inicialização ou o começo da transmissão por uma ECU de origem até o término da recepção da mensagem por parte da ECU de destino.

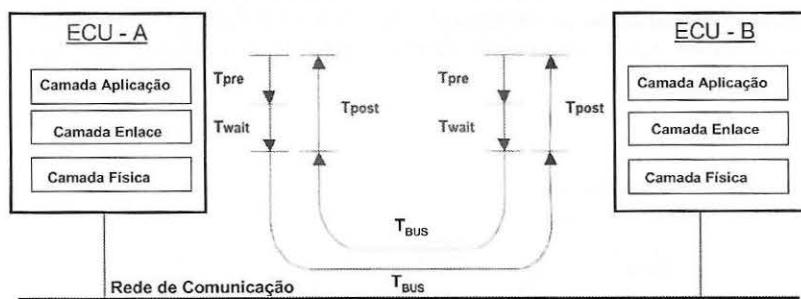


Figura 4. Composição do Atraso de Comunicação em NCS (Modificado de Lian, Moyne e Tilbury, 2002)

O atraso da ECU de origem é caracterizado pelo tempo de pré-processamento, T_{pre} , que é a soma do tempo de computação com o tempo de codificação realizado no inicio de cada mensagem. O tempo de espera total, T_{wait} , é caracterizado pela soma do tempo de espera na fila, com o tempo de bloqueio. O tempo de espera na fila é o tempo que uma mensagem espera no buffer da ECU 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 da rede industrial, T_{bus} , é caracterizado pela soma do tempo total de transmissão da mensagem no barramento, com o atraso de propagação da rede. Esse valor depende do tamanho da mensagem, da velocidade de transmissão e do tamanho do barramento de comunicação. O atraso na ECU de destino é caracterizado pelo tempo de pós-processamento, T_{post} , que é a soma do tempo de decodificação com o tempo de computação, realizado no final da transmissão de cada mensagem.

Lian, Moyne e Tilbury (2002) afirmam que os atrasos de comunicação encontrados em NCS dependem do protocolo de comunicação escolhido e de parâmetros de configuração da rede de comunicação. Entre esses parâmetros podem ser citados a velocidade de transmissão (largura de banda), o tamanho das mensagens de dados, os períodos de amostragem dos dispositivos e a porcentagem de mensagens perdidas. Outro critério muito importante em relação NCS diz respeito ao cumprimento do requisito temporal de cada mensagem (*deadline*), ou seja, as mensagens têm que ser transmitidas corretamente em um tempo limitado e menor que seu período de amostragem. Caso isso não ocorra, sobreposição e perdas de mensagens podem ocorrer na rede de comunicação, deteriorando o desempenho do sistema.

2.3. Fatores que exercem Influência no Desempenho e Estabilidade de um NCS

Com a inclusão da rede de comunicação no sistema de controle em malha fechada, fatores degenerativos (Perez, 2006) como os atrasos de comunicação e a discretização do sinal (ou amostragem) acabam exercendo grande influência sobre o comportamento do sistema. Esses fatores acabam deteriorando o desempenho do NCS, podendo torná-lo instável. O trabalho de Tipsuwan e Chow (2003) apresenta dois gráficos, mostrados na Figura 5, que relacionam a influência de um atraso de comunicação (τ) no desempenho e estabilidade de um NCS.

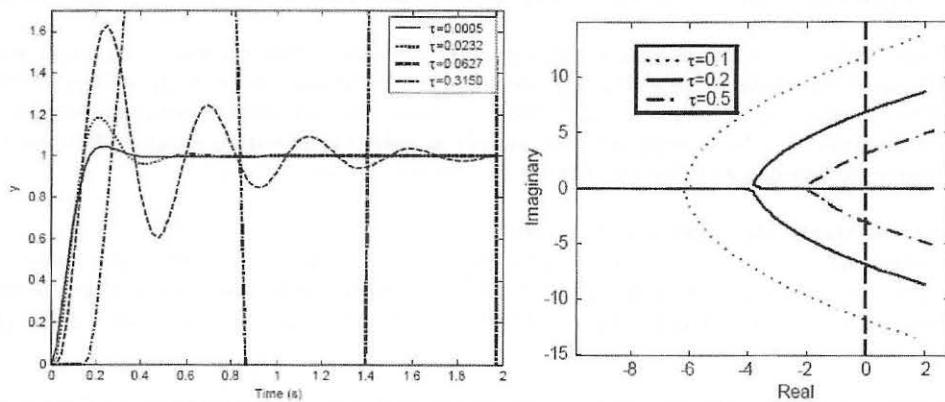


Figura 5. Efeito do Atraso de Comunicação (τ) no Desempenho e Estabilidade de um NCS (Tipsuwan e Chow, 2003)

De acordo com os gráficos da Fig. (5), percebe-se que o aumento do atraso de comunicação (τ) no NCS provoca uma deterioração do desempenho do sistema (oscilação e aumento do tempo acomodação e valor máximo de pico ou *overshoot*) e um atraso inicial na resposta do sistema, visto no primeiro gráfico referente à resposta a um degrau de entrada do NCS. Tal aumento acarreta também uma diminuição da margem de estabilidade do sistema (deslocamento do gráfico do lugar das raízes para a direita no eixo real), visto no segundo gráfico referente ao lugar das raízes do NCS.

A Figura 6 apresenta um diagrama que relaciona o período de amostragem dos sinais com o desempenho do sistema de controle implementado sob diferentes formas, demonstrando a grande influência da discretização no comportamento de um NCS. Os critérios de classificação do desempenho de controle podem ser estabelecidos de forma a refletirem especificações do NCS projetado, tais como margem de fase, tempo de acomodação, valor máximo de pico e erro em regime permanente.

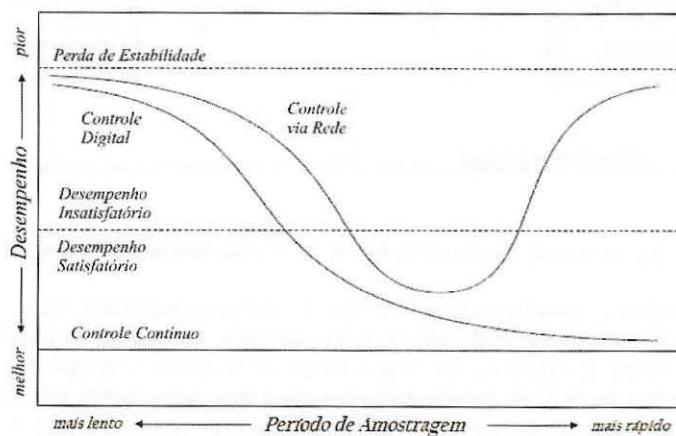


Figura 6. Efeito da Amostragem do Sinal no Desempenho de um NCS (Modificado de Lian et al., 2006)

De acordo com a Fig. (6), 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 a rede e um aumento nos atrasos de comunicação pode ser esperado. Caso esse período de amostragem seja muito rápido, pode ocorrer a saturação da rede de comunicação. Nessa situação, onde a rede fica sobrecarregada de mensagens, novas mensagens são enviadas para a rede sobrepondo as anteriores que ainda não tinham sido transmitidas e erros de transmissão tornam-se constantes, podendo tornar o sistema de controle instável.

3. FERRAMENTAS DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DE NCS

De modo a facilitar as tarefas de análise e simulação de desempenho de NCS, diversas ferramentas de suporte têm sido desenvolvidas (Torngren et al, 2006). Essas ferramentas fornecem facilidades para analisar o comportamento do sistema de controle por meio da simulação. A simulação facilita a avaliação de resultados, pois permite a repetição de simulações para o mesmo modelo do NCS variando-se apenas os parâmetros desejados e obtendo-se assim informações mais específicas (Cervin et al, 2003). A partir desta potencialidade, o projetista consegue avaliar as mudanças feitas ou parâmetros definidos no projeto do NCS, com respeito a métricas relacionadas ao desempenho desses sistemas (Acton et al, 2006). Assim a avaliação de um NCS pode ser focalizada em:

- ✓ Analisar quais fatores (atrasos de comunicação, discretização do sinal, parâmetros da rede de comunicação) afetam o desempenho e/ou a estabilidade de um NCS;
- ✓ Analisar qual fator é o mais importante ou que mais influencia no projeto de um NCS;
- ✓ Analisar métricas de desempenho relacionadas ao controle e estabilidade do NCS (tempo de acomodação, máximo de pico, tempo de subida, erro em regime, margem de estabilidade e de ganho);
- ✓ Analisar métricas de desempenho relacionadas à rede de comunicação do NCS (taxa de utilização da rede, atrasos de comunicação, tempo de transmissão e período de amostragem de mensagens, *jitter* e tempo de resposta).

3.1. Síntese das Ferramentas Analisadas

Diversas ferramentas têm sido desenvolvidas com o intuito de auxiliar no projeto e análise de NCS, que englobam os assuntos da teoria de controle, sistemas de tempo real e redes de comunicação. A maioria dessas ferramentas tem sido baseada no ambiente de desenvolvimento Matlab/Simulink, impulsionado por sua grande difusão e aceitação. Um levantamento de informações sobre algumas destas ferramentas é realizado e apresentado. Esse levantamento buscou selecionar ferramentas de acordo com o requisito inicial de permitir o estudo de NCS com o protocolo CAN. As ferramentas analisadas neste trabalho foram:

- ✓ AIDA (Redell, El-Khoury e Torngren, 2004), desenvolvida pelo Instituto Royal de Tecnologia na Suécia;
- ✓ TORSCHE (Sucha et al, 2006), desenvolvido pela Universidade Técnica de Czech na República Tcheca;
- ✓ Truetime e Jitterbug (Cervin et al, 2006), desenvolvidas pela Universidade de Lund na Suécia;
- ✓ PiccSIM (Nethi et al, 2007), desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Helsinque na Finlândia;
- ✓ NCS_Simu (Yang, 2007), desenvolvido pela Universidade de Sussex na Inglaterra.

3.1.1. AIDA

A ferramenta AIDA (*Automatic Control in Distributed Applications* - <http://www.md.kth.se/RTC/aida/>) é um ambiente de desenvolvimento voltado para projeto e análise de modelos de sistemas de controle em tempo real. Esta ferramenta permite ao projetista do sistema levar em consideração efeitos de implementação como atrasos de comunicação, variações de tempo de execução de tarefas, escalonamento e parâmetros de comunicação na etapa de análise de desempenho do sistema de controle. Uma análise temporal do sistema modelado pode ser analisada, fornecendo informações a respeito do cumprimento de requisitos temporais e de controle.

Nessa ferramenta, a parte relacionada ao projeto do controle é implementada no ambiente Matlab/Simulink enquanto que a parte relacionada à arquitetura do sistema e as análises de parâmetros de tempo real são realizadas em um ambiente desenvolvido com o software Dome (*Domain Modeling Environment*). No entanto, esse ambiente de desenvolvimento em Dome, baseado em fluxograma (“tradução” ou importação do modelo desenvolvido no Matlab), e a necessidade de entrada de dados específicos sobre o sistema (como tempo de execução de funções de processamento, leitura de dados e transmissão de mensagens) acabam dificultando a utilização desta ferramenta.

3.1.2. TORSCHE

A ferramenta Torsche (*Time Optimization of Resources, Scheduling* - <http://rtimes.felk.cvut.cz/scheduling-toolbox/>) é um toolbox do Matlab composto por algoritmos de escalonamento que podem ser utilizados com o intuito de otimizar a resposta temporal de um sistema e atingir parâmetros de tempo real desejados para o sistema de controle. A

ferramenta pode ser utilizada também para verificar o desempenho e operação de um NCS antes de sua implementação física, através de análises de métricas de desempenho relacionadas à rede de comunicação.

A utilização desta ferramenta, desenvolvida de acordo com o paradigma da orientação a objetos, é baseada em um conjunto de funções com sintaxe definida, especificados para cada dispositivo do sistema. Essas funções relacionam os dados de entrada (tempo de processamento, *deadline*, peso ou prioridade, latência) com o algoritmo de escalonamento desejado. Os dados de saída do sistema (tempos de execução, escalonamento de tarefas) são apresentados na forma de lista de tarefas realizadas ou através de gráficos visualizados através de comandos convencionais do Matlab (*plot*). Esta interface gráfica é um ponto forte da ferramenta e auxilia nas tarefas de análise de resultados.

3.1.3. Truetime e Jitterbug

A ferramenta TrueTime (<http://www.control.lth.se/truetime>) é um toolbox do MATLAB/Simulink utilizado para facilitar a simulação de operação e comportamento temporal de um NCS ou um sistema distribuído com múltiplos controladores. Todo o sistema de controle (definição do modelo da planta, do controlador e do tipo de rede utilizado) pode ser modelado no Simulink, através da utilização de sua biblioteca de blocos convencional juntamente com uma adicional, desenvolvida para permitir a inclusão da rede de comunicação no sistema. Os blocos relacionados à rede de comunicação simulam o mecanismo de acesso ao meio e a transmissão das mensagens, de acordo com o tipo de rede ou protocolo escolhido e seus respectivos parâmetros de configuração. A ferramenta suporta a análise de redes como CSMA/CD (Ethernet), CSMA/AMP (CAN), Switched Ethernet, FDMA, TDMA (TTP - *Time triggered protocol*), Token bus, IEEE 802.11 (WLAN) e IEEE 802.15.4 (Zigbee). Desenvolvimentos têm sido feitos por usuários para possibilitar a simulação de protocolos de alto nível que utilizam as redes disponíveis na ferramenta. Como por exemplo TCP (Henriksson & Cervin, 2003) e Modbus/TCP baseados no CSMA/CD, Profibus e Controlnet baseados no Token bus e TTCAN e FlexRay (Albert, Pietsch & Voetz, 2005) baseados no TDMA. A utilização do Simulink facilita a utilização da ferramenta e permite estudar a influência da rede de comunicação no desempenho de um NCS.

A ferramenta Jitterbug (<http://www.control.lth.se/user/lincoln/jitterbug/>) é um toolbox do MATLAB que permite a aplicação da teoria LQG de controle para um NCS. É composta por um conjunto de funções do Matlab que fazem interface com o toolbox *Control Systems*, permitindo a inicialização da ferramenta, configurações do sistema e o cálculo de um índice de desempenho ou uma função custo relacionada ao controle do NCS. Com a utilização da ferramenta pode-se obter um critério quadrático de desempenho do NCS de acordo com várias condições temporais relacionadas à rede de comunicação, como presença de atrasos de comunicação, *jitter* e períodos de amostragem das mensagens. Outro fato importante é a possibilidade de computar um gráfico do espectro da qualidade de controle de um NCS em função dessas condições temporais como, por exemplo, uma curva que relacionaria a qualidade do controle de uma planta em malha fechada, em função do período de amostragem e do *jitter* do NCS.

3.1.4. PiccSIM

A ferramenta PiccSIM (*Platform for Integrated Communications and Control design, Simulation, Implementation and Modeling* - <http://www.control.tkk.fi/dev/MoCoNet/PiccSIM.html>), antiga MoCoNet, foi desenvolvida para modelagem, projeto e simulação de NCS. Esta plataforma integra as ferramentas de projeto do Matlab/Simulink com um simulador de redes (NS-2, 2007) de grande difusão no meio acadêmico. A partir desse simulador de redes (software livre) pode-se implementar modelos de redes de comunicação com ou sem fio ou utilizar modelos previamente desenvolvidos e disponibilizados por outras instituições de pesquisa. Um modelo de redes CAN para o simulador NS-2 foi implementado em Fummi et al (2004). A utilização deste simulador amplia as possibilidades de aplicação da ferramenta PiccSIM, permitindo a simulação e a análise de desempenho de NCS com uma grande diversidade de redes e protocolos de comunicação. No entanto, a ferramenta não disponibiliza nenhum desses modelos de redes e assim para sua utilização, acaba sendo necessária a obtenção ou implementação desses modelos por parte do usuário.

Uma versão online dessa ferramenta está disponível no site do desenvolvedor, permitindo a realização de análises e simulações pela internet e também de dois experimentos remotos previamente disponíveis. No processo de utilização da ferramenta pela internet, pode ser usado um modelo fornecido (*template* do Matlab – *arquivo.mdl*) a partir do qual o usuário pode projetar o controlador a ser utilizado. É necessária também a escolha do tipo de rede de comunicação a ser utilizado, juntamente com o envio (*upload*) do arquivo com o modelo da rede no simulador NS-2. Esta possibilidade de utilização online da ferramenta representa uma vantagem, pois acaba com uma eventual indisponibilidade de utilização da ferramenta devido a algum requisito ou conhecimento prévio de software.

3.1.5. NCS_Simu

A ferramenta NCS_Simu (*Networked Control System Simulation package* - <http://www.sussex.ac.uk/Users/taiyang/>) é um pacote de simulação de NCS composto por uma biblioteca de blocos do Simulink. O usuário da ferramenta pode utilizar todas as facilidades do ambiente do Simulink, inserindo onde necessário os blocos relacionados à rede de comunicação (simulam o processo de comunicação sensor – controlador e controlador - atuador). As principais vantagens dessa ferramenta são a possibilidade de se incluir nas simulações realizadas, os efeitos causados pelo atraso de comunicação relacionado ao não-sincronismo de amostragem das mensagens (o atraso na amostragem de uma mensagem acaba influenciando na amostragem de mensagens

subseqüentes) e a taxa de perdas de pacotes ou mensagens transmitidos pela rede de comunicação. De acordo com o autor da ferramenta, esses dois efeitos não são analisados em outras ferramentas disponíveis.

Outra característica importante da ferramenta é que detalhes a respeito do protocolo de comunicação e do escalonamento de mensagens na rede não são requeridos, assim consegue-se simular NCS com qualquer tipo de rede ou protocolo. Para isso, foi assumido na modelagem da rede de comunicação que os principais fatores que influenciam no desempenho do NCS são o atraso de comunicação total e a taxa de perda de pacotes ou mensagens transmitidas. Assim, consegue-se generalizar a modelagem da rede a partir do fornecimento desses dois dados pelo usuário da ferramenta.

3.2. Comparação de Ferramentas Analisadas

A Tabela 1 sintetiza as informações obtidas e apresenta uma comparação das ferramentas analisadas considerando-se um levantamento sobre características, requisitos e conhecimentos de software, vantagens e usabilidade.

Tabela 1. Avaliação das Ferramentas de Análise, Simulação e Projeto de NCS

Ferramenta	Aplicação	Usabilidade (Fácil, Médio e Difícil)	Vantagens	Desvantagens	Requisitos de Conhecimentos
AIDA	Análise de métricas de desempenho da rede	(Difícil) - Facilidade na parte relacionada ao Matlab Dificuldade no fluxograma do sistema	Desempenho do sistema baseado no cálculo dos tempos de transmissão e atrasos de comunicação	Somente suporte para aplicações baseadas no CAN ou com escalonamento de mensagens	Conhecimentos de Matlab Informações sobre tempos de execução das tarefas
TORSCHE	Análise de métricas de desempenho da rede	(Médio) - Aprendizado da sintaxe das funções relacionadas à entrada de dados do sistema	Análise de problemas de otimização da rede (cumprimento de <i>deadlines</i> , diminuição de atrasos) Interface gráfica de resultados	Não fornece dados sobre controle ou resposta do sistema Necessita de dados de entrada difíceis de obter (latência)	Conhecimentos de Matlab Informações sobre sistemas de tempo real para escolha do algoritmos de escalonamento
Truetime	Análise de métricas de desempenho de controle	(Fácil) - Necessita aprendizado dos blocos da ferramenta Maior trabalho para projeto total do NCS	Análise de vários tipos de redes Desenvolvimento total do NCS (modelo da planta, controlador e rede utilizada)	Não fornece dados sobre utilização da rede e requisitos temporais de mensagens (tempo de transmissão, atrasos)	Conhecimentos de Matlab/Simulink Informações da rede (tamanho e período das mensagens, velocidade da rede)
Jitterbug	Análise de métricas de desempenho de controle	(Médio) - Necessita aprendizado da sintaxe das funções desenvolvidas do Matlab	Utilização da teoria LQG de controle Gráfico da influencia de parâmetro na qualidade do controle	Não geração de resultados no domino do tempo como overshoot, tempo de acomodação	Conhecimentos de Matlab Informações sobre parâmetro analisado (atraso de comunicação, <i>jitter</i>)
PiccSIM	Análise de métricas de desempenho de controle	(Fácil) - Disponibilidade online e interface gráfica auxiliam e facilitam a utilização	Possibilidade de utilização online Análise de vários tipos de rede devido à utilização do simulador NS-2 Somente projeto do controlador do NCS	Necessidade do modelo da rede a ser analisada para o simulador NS-2 Somente projeto do controlador do NCS	Conhecimento de Matlab para o projeto do controlador (se necessário)
NCS_Simu	Análise de métricas de desempenho de controle	(Médio) - Necessita aprendizado dos blocos relacionados à rede e alguns conceitos apresentados pelo autor	Inclusão de efeitos relacionados à rede de comunicação, não utilizados em outras ferramentas	Necessidade de utilização de grande número de blocos (aumenta com complexidade do sistema)	Conhecimentos de Matlab Informações sobre atrasos de comunicação total e taxa de perdas de mensagens

Neste trabalho foram analisadas ferramentas de suporte a NCS baseadas na plataforma Matlab/Simulink e que atendessem a um requisito inicial de permitir, no mínimo, a análise de NCS com redes CAN. Assim, um requisito de software inicial para utilização dessas ferramentas seria a disponibilidade dos softwares Matlab/Simulink. Entre as ferramentas analisadas, somente duas apresentam requisitos diferentes. Para o caso da ferramenta AIDA, é necessário também a utilização do ambiente desenvolvido com o software Dome e para o caso da ferramenta PiccSIM, sua utilização online não necessita de nenhum software. É importante citar que existem ainda várias outras ferramentas baseadas na plataforma Matlab/Simulink que não foram analisadas, como em El-Khoury e Torngren (2001) e também ferramentas baseadas em outras plataformas de desenvolvimento, como o Labview da National Instruments nos trabalhos de Godoy (2007) e Pinnati Jr e Brandão (2005).

A escolha de alguma ferramenta para utilização no projeto e desenvolvimento de um NCS deve-se basear nas definições de seu projetista. Tais definições têm sido baseadas em relação ao tipo de rede e protocolo de comunicação em que o NCS será baseado e aos parâmetros mais interessantes a serem analisados. Ressalta-se que essa escolha de parâmetros depende das necessidades de conhecimento da aplicação e do tipo de métrica de desempenho (de controle ou de rede) requeridos pelo projetista do sistema.

Entre as ferramentas avaliadas, diante da grande difusão e utilização no meio acadêmico internacional (Gaid et al, 2006; Zhao e Xia, 2006; Cervin, Ohlin e Henriksson, 2007) e também por causa de características que facilitam o desenvolvimento e avaliação de NCS sob diferentes configurações, o toolbox Truetime apresenta-se como a melhor avaliada e indicada para pesquisadores e desenvolvedores iniciantes na área de NCS.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma revisão geral sobre o desenvolvimento e a utilização de ferramentas de análise, simulação e projeto de NCS. Um enfoque principal foi direcionado para as ferramentas que possibilitassem a pesquisa de NCS com protocolo CAN, entre outros. Os resultados desta pesquisa fornecerão suporte às tarefas de simulação, análise e projeto de NCS no sentido de prover conhecimentos quanto à influência de fatores degenerativos no desempenho de um NCS. Também fornecerá informações sobre ferramentas de projeto existentes na área para facilitar a simulação de NCS.

Um levantamento de características, requisitos de software, vantagens e usabilidade de diversas ferramentas foi realizado. De acordo com esse levantamento, entre as ferramentas analisadas, a Truetime seria a melhor avaliada e apropriada para utilização na análise, simulação e projeto de NCS. Essa conclusão foi obtida diante de características como possibilitar o desenvolvimento total (modelo da planta, projeto do controlador e definição da rede), ser de fácil utilização e apresentar grande respaldo e aplicação no meio acadêmico. No entanto é importante reiterar que os resultados obtidos em um eventual projeto e desenvolvimento de um NCS seriam potencializados pela utilização conjunta de duas ou mais ferramentas.

A sistematização das informações obtidas neste trabalho permitiu criar uma documentação de referência para orientar trabalhos de pesquisa e desenvolvimento sob o tema de NCS, auxiliar no conhecimento de ferramentas de desenvolvimento existentes e constituir uma base para promover o desenvolvimento de grupos nacionais de pesquisa nesta área, que se encontra atualmente pouco difundida nacionalmente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação da Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio ao desenvolvimento desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Acton, K., Antolovic, M., Kalappa, N., Luntz, J., Moyne, J. and Tilbury, D., 2006, "Practical Metrics for Evaluating Network System Performance", Proceedings of the UM-ERC/RMS Network Performance Workshop, University of Michigan, Disponível em: <<http://erc.engin.umich.edu/publications/NPWPaper.pdf>>. Acesso em: Janeiro, 2008.
- Albert, A., Pietsch, B and Voetz, F., 2005, "Simulation Environment for Investigating the Impacts of Time-Triggered Communication on a Distributed Vehicle Dynamics Control System", Proceedings of the 1st International ECRTS Workshop on Real-Time and Control, Palma de Mallorca, Spain, July 5.
- Baillieul, J. and Antsaklis, P.J., 2007, "Control and Communication Challenges in Networked Real Time Systems", Proceedings of IEEE Technology of Networked Control Systems, Vol. 95, No. 1, pp. 09-28.
- Bosch, 2006, "CAN Specification Version 2.0", Disponível em: <<http://www.can.bosch.com>>, Acesso em: Julho, 2006.
- Cervin, A., Arzen, K.E., Henriksson, D., Lluesma, M., Balbastre, P., Ripoll, P. and Crespo, A., 2006, "Control Loop Timing Analysis Using TrueTime and Jitterbug", Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design, Munich, Germany, 4-6 October, pp. 1194-1199.
- Cervin, A., Henriksson, D., Lincoln, B., Eker, J. and Arzen, K.E., 2003, "How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime", IEEE Control System Magazine, Vol. 23, pp. 16-30.

- Cervin, A., Ohlin, M. and Henriksson, D., 2007, "Simulation of Networked Control Systems Using TrueTime", Proceedings of the 3rd International Workshop on Networked Control Systems: Tolerant to Faults, Nancy, France, June.
- Dome, 2007, "Dome guide version 5.2.2", Disponível em: <<http://www.htc.honeywell.com/dome>>, Acesso em: Outubro, 2006.
- El-Khoury, J. and Torngren, M., 2001, "Towards a toolset for architectural design of distributed real-time control systems," Proceedings of the 22nd IEEE Real- Time Systems Symposium, London, December, pp. 267- 276.
- Frutos, J.A., Cadiñanos, E., Pérez, J.I. and García, S., 2006, "Tool for Analysis and Simulation of TTCAN Communication in Distributed Systems", Proceedings of the 30th Annual International Conference on Computer Software and Applications, Chicago, 17-21 September, Vol. 2, pp. 119-122.
- Fummi, F., Martini, S., Monguzzi, M., Perbellini, G. and Poncino, M., 2004, "Software/Network Co-Simulation of Heterogeneous Industrial Networks Architectures", Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Design, San Jose, California, 11-13 October.
- Gaid, M.B., Cela, A., Diallo, S., Kocik, R., Hamouche, R. and Reama, A., 2006, "Performance Evaluation of the Distributed Implementation of a Car Suspension System", Proceedings of the IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems. Czech Republic, February.
- Godoy, E.P., 2007, "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.
- Henriksson, D and Cervin, A., 2003, "TrueTime 1.13 Reference Manual", Internal Report, Department of Automatic Control, Lund University, Sweden, October 2003.
- Hespanha, J.P., Naghshtabrizi, P. and XU, Y., 2007, "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems", IEEE Proceedings of the Technology of Networked Control Systems, Vol. 95, No. 1, pp. 138-162.
- Huo, Z., Fang, H. and Ma, V., 2004, "Networked control system: state of the art", Proceedings of the 50th World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol. 2, pp. 1319- 1322.
- Johansson, K.H., Torngren, M. and Nielsen, L., 2005, "Vehicle applications of controller area network", Handbook of Networked and Embedded Control Systems, Ed. Birkhäuser, 25p.
- Lian, F.L., Moyne, J.R. and Tilbury, D.M., 2002, "Network Design Consideration for Distributed Control Systems", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10(2), pp. 297-307.
- Lian, F.L., Yook, J.K., Tilbury, D.M. and 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. Vol. 2(1), pp. 12-24.
- Lopes, W.C. (2007). Análise de Desempenho do Protocolo CAN para Aplicação na Área Agrícola utilizando Rede de Petri Colorida, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Moyne, J.R. and Tilbury, D.M., 2007, "The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data". IEEE Proceedings of the Technology of Networked Control Systems, Vol. 95, No. 1, pp. 29-47.
- Nethi, S., Pohjola, M., Eriksson, L. and J'anti, R., 2007, "Platform for Emulating Networked Control Systems in Laboratory Environments", Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, Helsinki, Finland, June 18-21.
- NS-2, 2007, "The Network Simulator", Disponível em: <www.isi.edu/nsnam/ns/>, Acesso em: Novembro, 2007.
- Othman, H.F., Aji, Y.R., Fakhreddin, F.T. and Al-Ali, A.R., 2006, "Controller Area Networks: Evolution and Applications", Proceedings of the 2nd International Conference on Information and Communication Technologies, Vol. 2, pp. 3088- 3093.
- Perez, D.A., 2006, "Propostas de Co-Projeto para Sistemas de Controle via Rede". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Pinotti Jr, M. and Brandão, D., 2005, "A Flexible Fieldbus Simulation Platform for Distributed Control Systems Laboratory Courses", International Journal of Engineering Education, Vol. 21, No. 6, pp. 1050-1058.
- Redell, O., El-Khoury, J. and Torngren, M., 2004, "The AIDA tool-set for design and implementation analysis of distributed real-time control systems", Journal of Microprocessors and Microsystems, Vol. 28:4, pp. 163-182.
- SO, J.K.C., 2003, "Delay Modeling and Controller Design for Networked Control Systems", Master Dissertation, University of Toronto, Toronto.
- Sucha, P., Kutil, M., Sojka, M. and Hanzalek, Z., 2006, "TORSCHE Scheduling Toolbox for Matlab", Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design, pp. 1181-1186.
- Tipsuwan, Y. and Chow, M.Y., 2003, "Control Methodologies in Networked Control Systems", Control Engineering Practice, Vol. 11, No. 3, pp. 1099-1111.
- Torngren, M., Henriksson, D., Arzen, K.E., Cervin, A. and Hanzalek, Z., 2006, "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, Munich, Germany, 4-6 October, pp. 1173-1180.
- Xia, F., Wang, Z., Sun, Y., 2004, "Simulation based performance analysis of networked control systems with resource constraints", Proceedings of the 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 3, pp. 2946-2951.

- Yang, T.C., 2006, "Networked control system: a brief survey", IEEE Proceedings of Control Theory and Applications", Vol. 153, No. 4, July, pp. 403–412.
- Yang, T.C., 2007, "Networked and Embedded Control Systems: An introduction, applications in automotive industry, and a new simulation package: NCS_Simu", Selected presentations, Disponível em: http://www.sussex.ac.uk/Users/taiyang/presentation/Intro_NCS_simu.pdf, Acesso em: Julho, 2007.
- Zhang, W., Branicky, M.S. and Phillips, S.M., 2001, "Stability of Networked Control Systems", IEEE Control System Magazine, Vol. 21(1), pp. 84–99.
- Zhao, W. and Xia, F., 2006, "Design and Simulation of Function Block Based Networked Control Systems", Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Beijing, China, August 30 - September 1.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

TOOLS FOR ANALYSIS, SIMULATION AND DESIGN OF NETWORKED CONTROL SYSTEMS: A REVISION

Eduardo Paciência Godoy, epgodoy@yahoo.com.br¹
Ricardo Yassushi Inamasu, ricardo@cnpdia.embrapa.br²
Arthur José Vieira Porto, ajvporto@sc.usp.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, USP
Avenida Trabalhador São Carlense, 400 CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo

² EMBRAPA Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1452 CEP 13560-970, São Carlos, São Paulo

Abstract. The introduction of fieldbus architectures in industrial systems can improve the efficiency and the reliability of the control system reducing time and costs of installation and maintenance. Recent applications of fieldbus systems demonstrate a new approach for the use of industrial networks such as CAN (Controller Network Area). In this approach, the controller and the plant are physically separated and connected through a communication network. This type of implementation, where the control loops are closed under an industrial network, has been called of Networked Control Systems (NCS). The main challenges related to the development of NCS are the effects caused by the inclusion of the communication network in the control system. The performance and the stability of the NCS are degraded by the presence of the network delays between the sensors, actuators and controllers of the control system. To minimize these effects, support tools for the development of NCS have been developed to assist the designer in the study of the network influence in the performance of the control system. These tools also allow the simulation and the optimization of control parameters of the designed system. A revision of the development and use of these tools for the analysis, simulation and design of NCS, with emphasis in CAN protocol, is presented in this work. A survey of characteristics, software requirements, advantages and usability of several tools is presented. The systematization of the information included in this work aims to generate a reference documentation to guide future researches and developments about this theme.

Keywords: Networked control systems NCS, development tools, network delays

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.