

## PLATAFORMA DIDÁTICA PARA SIMULAÇÃO DE ATRASOS DE REDE DE COMUNICAÇÃO APLICADOS A SISTEMAS DE CONTROLE LINEARES E INVARIANTES NO TEMPO

*Bruna Fortunato – bruna.fortunato@alunos.utfpr.edu.br*  
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná - câmpus Cornélio Procópio– UTFPR - CP*  
*Endereço Av. Alberto Carazzai, 1640 - Vila Seugling,*  
*86300-000– Cornélio Procópio – Paraná.*

*Cristiano Marcos Agulhari – agulhari@utfpr.edu.br*  
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná - câmpus Cornélio Procópio– UTFPR - CP \**  
*Endereço Av. Alberto Carazzai, 1640 - Vila Seugling,*  
*86300-000– Cornélio Procópio – Paraná.*

**Resumo:** *Esta plataforma didática consiste em uma interface para simulação de sistemas de controle via rede (ou Networked Control Systems – NCS), facilitando os testes de desempenho e robustez em sistemas de controle submetidos à atrasos de comunicação. Deseja-se, por meio desta interface, simular o comportamento do projeto de controle real sujeito a atrasos recorrentes em NCS. Os atrasos são invariantes no tempo e o sistemas de controle é do tipo Linear e Invariante no Tempo (LIT). Para exemplificar seu uso, a interface deve ser submetida a testes com atrasos de rede simulados em um modelo de sistema de controle de velocidade de um motor DC, proposto por Meshram e Kanojiya (2012).*

**Palavras-chave:** *Atrasos, Comunicação-Remota, Simulação, Sistemas LIT, NCS.*

### 1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO VIA REDES - NCS

O uso de redes de comunicação serial integradas à sistemas de controle (ou NCS do inglês *Networked Control Systems*) visa substituir a tradicional ligação ponto a ponto realizada por cabos físicos. Desta forma, o NCS interconecta sensores, atuadores e a planta por meio de uma rede de transmissão de dados, formando uma malha de controle remota (GODOY et al., 2008). Automóveis inteligentes, aeronaves, plantas de manufatura e outros contextos, que necessitam o uso de uma comunicação controlada e automática, são os principais utilizadores de um NCS.

Sabe-se que o atraso de comunicação em um NCS representa fontes prejudiciais ao desempenho e estabilidade em sistema de controle e são inevitáveis (Mori, et.al.,2010). Em geral, os atrasos ocorrem pela quantidade de componentes ligados à rede em tempo real, de tal forma que o envio e recebimento de pacotes de informações ocasionam saturações da rede (TANENBAUM, 2003). Diante disto, Joelianato (2011) apresentou um estudo para tornar o NCS robusto a atrasos variantes no tempo; Mori *et.al* (2010) utilizaram modelos estocásticos para representar atrasos para um sistema de predição; Kolla e Mainoo (2012) aplicaram o modelo LQR (do inglês, *Linear Quadratic Regulator*) para tornar o NCS robusto aos efeitos de atrasos induzidos.

Neste trabalho, apresenta-se uma plataforma didática para simulação de sistemas LIT com

atrasos induzidos. Para isso, uma *interface* encapsula uma rede de comunicação serial integrada e com isso, simula um sistema de controle via rede (NCS) incluindo atrasos simulados. Seu funcionamento se dá por meio de parâmetros definidos pelo usuário, tais como: função de transferência da planta, controlador e valores de duração para atrasos em segundos.

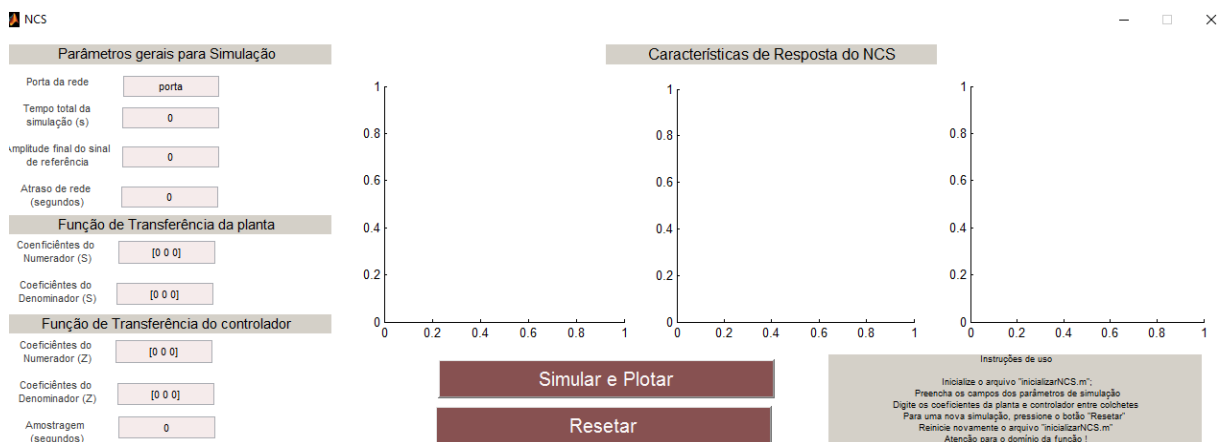
Esta abordagem tem como proposta auxiliar testes de automação sem a exigência em linguagem C, modelagem em diagramas de blocos para simulação ou aquisição de plataformas físicas para testes de desempenho e ajustes de parâmetros de controle. Em geral, a presença de atrasos em rede é desconsiderada ou necessita de *softwares* complexos para sua simulação. Como a *interface* é implementada utilizando apenas os pacotes básicos do *software* Matlab, esta se torna atraente para ser utilizada em laboratórios de ensino, sobretudo em disciplinas e projetos de controladores envolvendo redes industriais e projetos de automação em geral.

O modelo de transmissão da rede adotado foi baseado pelo aluno de Engenharia da Computação, Vinicius Henrique Moraes de Oliveira, estudante da UTFPR de Cornélio Procópio, sendo idealizado o projeto da *interface* e o diagrama de controle pelos autores deste trabalho. Esta plataforma consiste em uma ferramenta que transmite os efeitos que os atrasos podem causar em um sistema de controle via rede.

## 2 PROJETO DA INTERFACE PARA SIMULAÇÃO

Na Figura 1 é apresentada a *interface* para simulação. Esta *interface* utiliza a *toolbox* GUI (*Graphical User Interface*) disponível no *software* Matlab/Simulink®. O *download* da *interface* bem como visualização de um tutorial de instruções podem ser obtidos através do endereço eletrônico do laboratório de pesquisa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Laboratório de otimização de Controle e Otimização de Sistemas (LACOS).

Figura 1 – Apresentação da *interface* para simulação



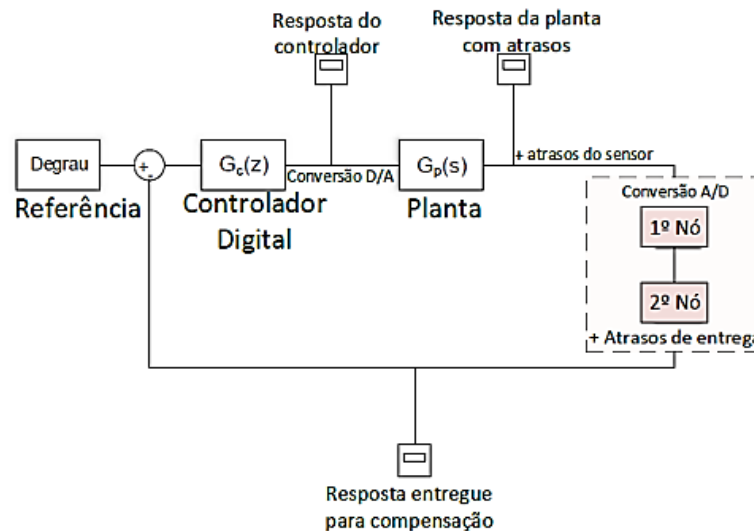
Fonte: Autoria própria.

A *interface* é inicializada através de uma linha de comando no *workspace* do Matlab/Simulink®. O comportamento entre o controlador e a planta é avaliado mediante o efeito dos valores de atrasos pré-setados em cada simulação. A função de transferência utilizada no NCS segue a Equação (1).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = e^{-(t_k^{sc} + t_k^{ca})s} G(s) \quad (1)$$

Tal que  $G(s)$  corresponde à função de transferência do NCS em malha fechada,  $e^{-(t_k^{sc})s}$  é o atraso entre sensor e o controlador e  $e^{-(t_k^{ca})s}$  é o atraso entre o controlador e a planta. O padrão arquitetural do NCS encapsulado é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama em blocos do NCS encapsulado.



Fonte: Autoria própria.

Este padrão arquitetural foi baseado no modelo de sete camadas OSI (*Open Systems Interconnection*) com foco nas camadas de transporte e enlace sendo a comunicação realizada pelo protocolo UDP (*User Datagram Protocol*). Em cada simulação, os pacotes de informações digitais da planta são gerados pela soma entre atrasos no primeiro e segundo nó do NCS, sendo o sinal resultante disponibilizado ao controlador digital,  $G_c(z)$ , para compensação.

Ao final de cada simulação, a *interface* apresenta três respostas gráficas: a resposta em frequência da planta enviada para a rede com atrasos; o sinal de rede recebido e enviado com novos atrasos após a compensação digital; e a resposta entregue ao atuador na planta.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para testes, a *interface* com atrasos simulados foi comparada ao resultado simulado de um sistema utilizando diretamente o diagrama de blocos do Matlab/Simulink®. A planta de controle consiste no modelo proposto por Meshram e Kanojiya (2012), ou seja

$$G_p(s) = \frac{0.015}{0.01s^2 + 0.14s + 0.400015} \quad (2)$$

tal que  $G_p(s)$  representa a função de transferência em malha aberta dada pela transformada de Laplace.

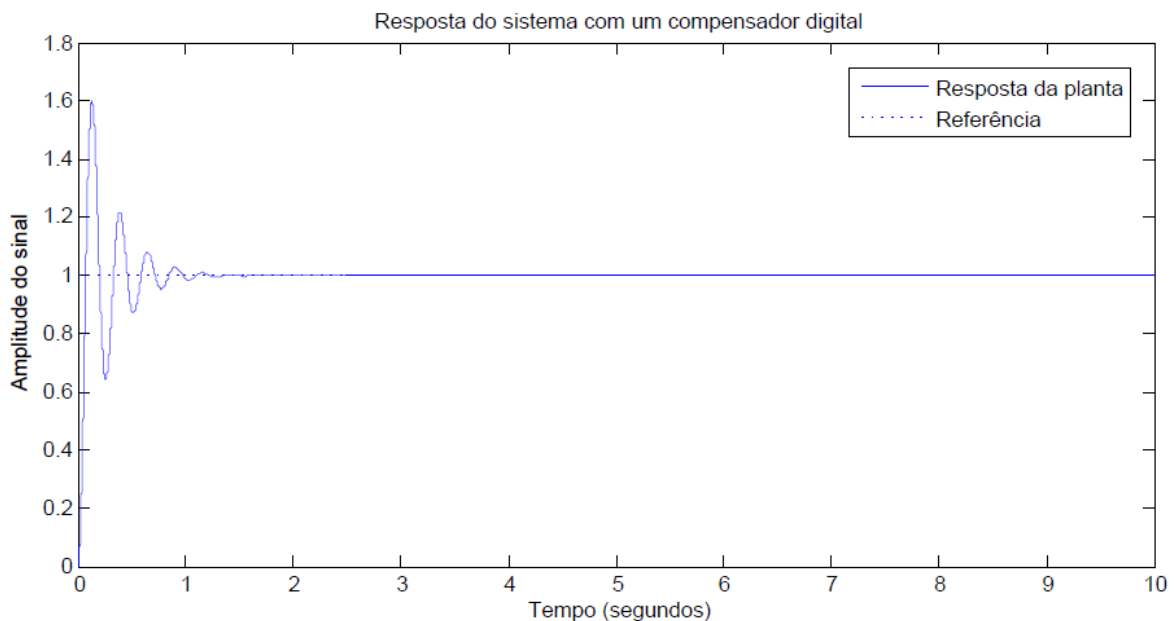
Pela Equação (2), foi projetado um controlador do tipo Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) por aproximações em um período  $T_s = 0.001s$ , resultando em:

$$G_z(z) = \frac{405.5z^2 - 804.38z + 399}{z^2 - 1.99z + 0.99} \quad (3)$$

com  $G_z(z)$  representando a função de transferência do controlador em termos do domínio Z.

Realizou-se, então, a simulação do modelo de planta em paralelo ao controlador  $G_z(z)$ , utilizando o diagrama de blocos do Matlab/Simulink®. O sinal de referência adotado consistiu em um degrau com amplitude unitária. A resposta do sistema de controle sem atrasos é apresentada a seguir.

Figura 3 – Resposta do sistema de controle digital ideal.



Fonte: Autoria própria.

Após, a *interface* foi utilizada considerando os coeficientes das Equação (2) e Equação (3) com atrasos de rede simulados. Este procedimento esteve conforme as instruções apresentadas a seguir.

1. Digite “*inicializarNCS*” na janela de comando do Matlab/Simulink®;
2. Preencha os campos dos parâmetros da simulação;
3. Digite os coeficientes da planta e controlador entre colchetes;
4. Para uma nova simulação, pressione o botão “*Resetar*”
5. Digite novamente “*inicializarNCS*” na janela de comandos do Matlab/Simulink®;
6. Atenção para o domínio de cada função de transferência.

**Observação:** Note que no canto inferior direito da *interface* estas instruções também estão disponíveis.

Os parâmetros considerados para esta simulação estão disponíveis na Tabela 1.

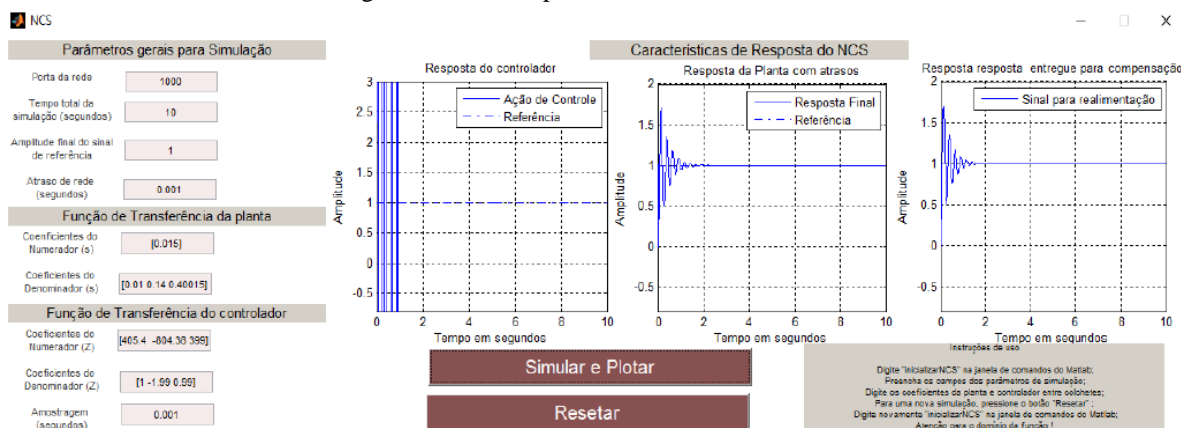
Tabela 1 – Resultados obtidos após simulações.

Parâmetros de simulação	1ª Simulação	2ª Simulação	3ª Simulação	4ª Simulação
Porta para comunicação de rede	1000	1000	1000	1000
Tempo em segundos	10	10	10	10
Amplitude do sinal de referência	1s	1s	1s	1s
Valores de atraso de rede	1ms	5ms	6ms	4s
$G_p(s)$	$G_p(s) = \frac{0.015}{0.01s^2 + 0.14s + 0.400015}$			
$G_z(z)$	$G_z(z) = \frac{405.5z^2 - 804.38z + 399}{z^2 - 1.99z + 0.99}$			
Tempo de amostragem de rede em segundos	1ms	1ms	1ms	1ms

Fonte: Autoria própria.

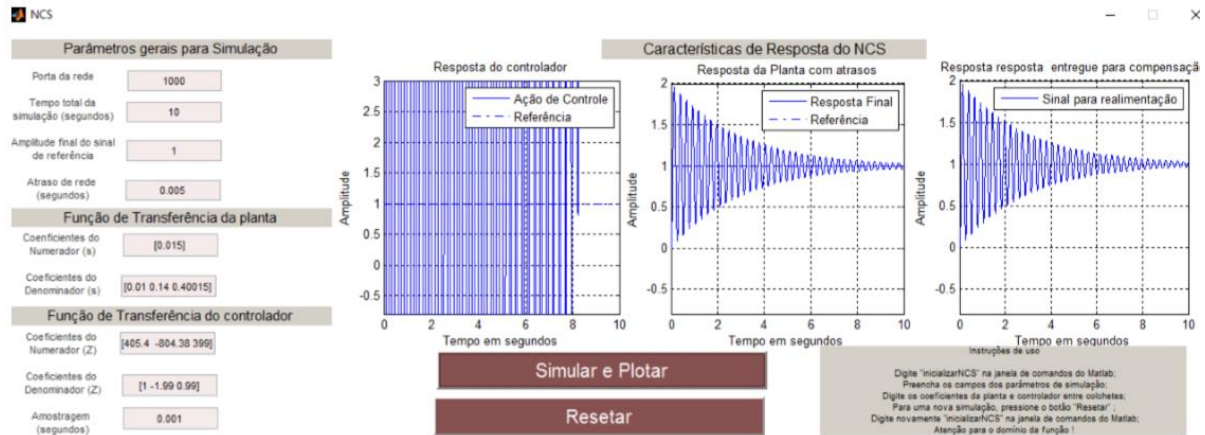
Os resultados provenientes de cada simulação são apresentados a partir da Figura 5 a Figura 8.

Figura 5 NCS encapsulado com atraso de 1ms.



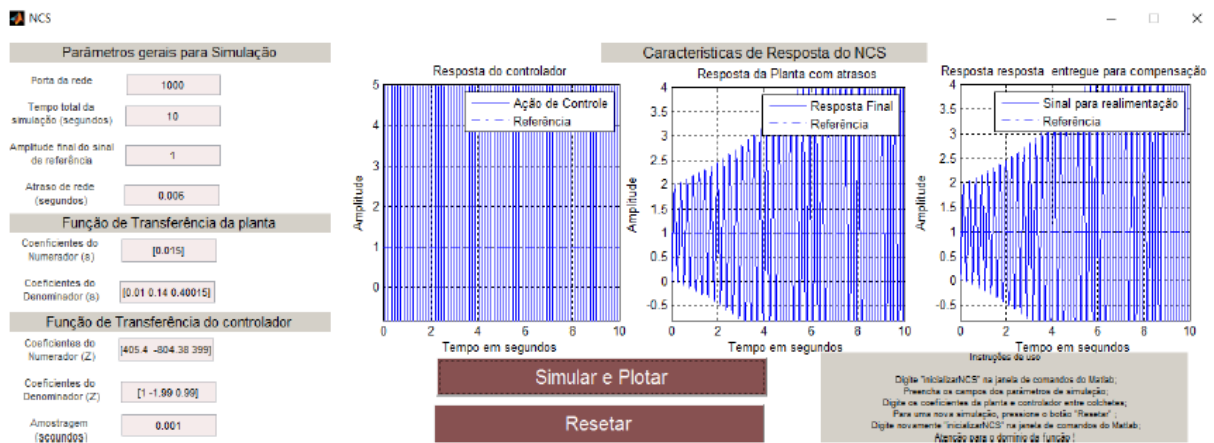
Fonte: Autoria própria.

Figura 6 NCS encapsulado com atraso de 5ms.



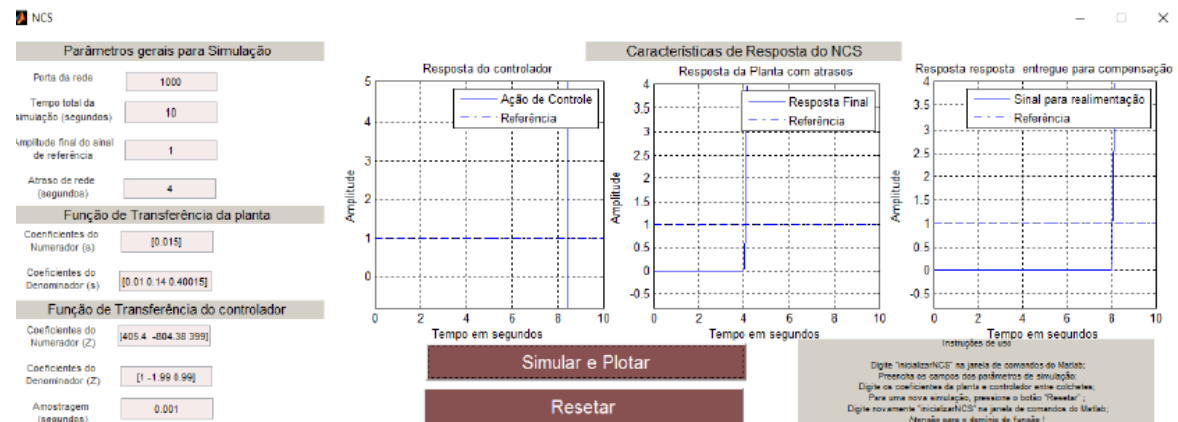
Fonte: Autoria própria.

Figura 7 NCS encapsulado com atraso de 6ms.



Fonte: Autoria própria

Figura 8 NCS encapsulado com atraso de 4s.



Fonte: Autoria própria

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das simulações realizadas, observa-se que com a inserção de atrasos em até a 5ms o sistema apresenta um maior transitório. Já para atrasos superiores a estes o sistema apresenta comportamento instável. Com a simulação de atraso com duração de 4s, pode-se validar a comunicação entre a *interface* e o sistema de controle encapsulado com atrasos (NCS), uma vez que sua resposta gráfica apresenta a réplica da resposta com atrasos respectivos.

Foi possível utilizar a *interface* através de pacotes básicos disponibilizados no *software* Matlab/Simulink®. A *interface* consiste em um plataforma didática para simulação de atrasos invariantes em sistemas LIT, auxiliando alunos durante testes em sistemas automatizados que envolvem o uso de redes industriais, ou NCS. Além disso, a utilização da *interface* pode ser uma alternativa segura, uma vez que o desenvolvimento e síntese de controladores não requer a utilização de protótipos físicos, conhecimentos avançados em linguagem C ou modelagem por diagrama de blocos.

#### *Agradecimentos*

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

#### REFERÊNCIAS

JOELIANTO, Endra. Networked control systems: Time delays and robust control design issues. In: **2011 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation**. IEEE, 2011. p. 16-25.

Disponível

em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6130121&isnumber=6130113>. Acesso em: 08/05/2019.

LATHI, Bhagwandas Pannalal. **Signal processing and linear systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

MESHARAM, P. M.; KANOJIYA, Rohit G. Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor. In: **IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)**. IEEE, 2012. p. 117-122.

MO, Huadong; XIE, Min. Modelling and analysis of transmission delays and packet dropouts on the reliability of digital networked control systems. In: **2013 Chinese Automation Congress**. IEEE, 2013. p. 187-192.

MORI, Tsunenori et al. Compensation of networked control systems with time-delay. In: **2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)**. IEEE, 2014. p. 752-757.

TANENBAUM, A.S. **Redes de Computadores**. São Paulo: Ed. [S.l.]: Campus, 2003.

TANG, Bin; WANG, Jun; ZHANG, Yun. A delay-distribution approach to stabilization of networked control systems. **IEEE Transactions on Control of Network Systems**, v. 2, n. 4, p. 382-392, 2015.

KOLLA, Sri R.; MAINOO, Joseph. Effect of network-induced delays in control systems: Application to dc motor control. In: **2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)**. IEEE, 2012. p. 1-6. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6302075&isnumber=6301985>. Acesso em: 08/05/2019.

WALSH, Gregory C.; YE, Hong. Scheduling of networked control systems. **IEEE control systems magazine**, v. 21, n. 1, p. 57-65, 2001.

ZHANG, Wei; BRANICKY, Michael S.; PHILLIPS, Stephen M. Stability of networked control systems. **IEEE control systems magazine**, v. 21, n. 1, p. 84-99, 2001.

## **DIDACTIC PLATFORM FOR SIMULATION OF COMMUNICATION NETWORK DELAYS APPLIED TO LINEAR AND INVARIANT CONTROL SYSTEMS IN TIME**

**Abstract:** *This didactic platform consists of an interface for simulation of Network Control Systems (NCS), facilitating performance tests and robustness in control systems subject to communication delays. We suggest at this interface to simulate the behavior of the actual control project subject to recurrent delays in NCS. The Delays and the control systems are Linear and Time Invariant (LIT). In order to exemplify our use, the interface must be tested with simulated network delays in a DC motor speed control system model proposed by Meshram and Kanojiya (2012).*

**Key-words:** *Delays, Remote Communication, Simulation, LIT Systems, NCS.*