

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE ACIONADO POR EVENTOS EM UM SISTEMA DE NÍVEL

GUILHERME MENDES CICARINI HOTT*, FERNANDO HENRIQUE DUARTE GUARACY†, RONAN ARRAES
JARDIM CHAGAS*

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*
Av. dos Astronautas 1758, Jd. da Granja, CEP 12227-010
São José dos Campos, SP, Brasil

†*Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira*
Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II, CEP 35903-087
Itabira, MG, Brasil

Emails: guilherme.hott@inpe.br, fernandoh@unifei.edu.br, ronan.arraes@inpe.br

Abstract— Networked control systems have as their feature data acquisition elements, actuators and control, spread over the process and interconnected by a communication channel. Communication channels have non-idealities such as delays, packet loss and bandwidth limitation. Therefore, this work presents an aperiodic control approach triggered by events with the goal of reducing the communication channel usage as a way of mitigating band limitation problems. The experiments were carried out in a liquid-level system and compared with a conventional control method. The results evidenced good performance, presenting similar performances and reaching reductions of about 85% in the communication channel usage.

Keywords— Event-triggered control, networked control systems, band-limitation.

Resumo— Sistemas de controle em rede tem como característica seus elementos de aquisição de dados, atuadores e de controle distribuídos ao longo do processo e interligados por um canal de comunicação. Canais de comunicação possuem não idealidades como atrasos, perdas de pacote e limitação de banda. Sendo assim, este trabalho apresenta uma abordagem de controle aperiódico acionado por eventos com o objetivo de diminuir o uso do canal de comunicação como forma de mitigar problemas de limitação de banda. Os ensaios práticos foram realizados em um sistema de nível e comparados ao controle convencional. Os resultados demonstraram bom funcionamento, mantendo desempenhos semelhantes e atingindo economias de cerca de 85% no uso do canal de comunicação.

Palavras-chave— Controle acionado por eventos, sistemas de controle em rede, limitação de banda.

1 Introdução

Em técnicas de controle convencionais, o canal de comunicação não é objeto de estudo, sendo considerado ideal. No contexto de sistemas de controle em rede (*Networked Control System* – NCS), como ilustrado na Figura 1, considera-se que estes canais apresentam não idealidades como perdas de pacotes, atrasos de transporte e problemas de limitação de banda (Cucuzzella et al., 2016; Losada, 2013).

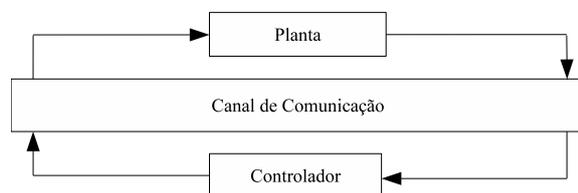


Figura 1: Sistema de controle em rede.

A implementação dos algoritmos de controle é feita por intermédio de plataformas digitais, as quais possuem capacidades definidas de processamento. Tradicionalmente, a execução destes algoritmos é realizada periodicamente, com taxa de amostragem definida. Este tipo de implementação é conhecida como acionada por tempo (*Time-*

triggered control – TTC) (Heemels et al., 2014).

Em NCS, a presença de sensores e atuadores distribuídos propiciam problemas de limitações de banda. O canal de comunicação é sobrecarregado pelo envio recorrente de sinais dos sensores e comandos aos atuadores a cada instante de amostragem, podendo impossibilitar aplicações práticas (Tabuada, 2007; Schenato et al., 2007).

O controle acionado por eventos (*Event-triggered control* – ETC) corresponde a uma forma de controle aperiódico em que o envio de dados não é realizado em cada período de amostragem, mas de acordo com condições predeterminadas, resultando com que o canal de comunicação seja menos exigido e resultando no uso mais eficiente dos recursos empregados nos sistema de controle (Demirel et al., 2013; van Eekelen et al., 2016; Mazo et al., 2010).

Neste contexto, este artigo apresenta a implementação do algoritmo de ETC proposto por Heemels et al. (2012) em um sistema de nível. O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre a estratégia de controle aperiódica. A Seção 3 apresenta o sistema de nível em questão. A Seção 4 apresenta o projeto de controle ETC para o sistema de nível. A Seção 5 apresenta os resultados de simulação. A

Seção 6 apresentada os resultados experimentais obtidos. Por fim, a Seção 7 apresenta as considerações finais e indicações de trabalhos futuros.

2 Controle Acionado por Eventos

Considere o modelo linear dado por

$$\frac{d}{dt}x_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t), \quad (1)$$

em que A_p é a matriz de estado, B_p é a matriz de de entrada, x_p é o vetor de variáveis de estados e u o vetor de entradas dado pela lei de controle

$$u(t) = K x_p(t), \quad (2)$$

com K sendo o vetor de ganhos do controlador. Em malha fechada, tem-se

$$\frac{d}{dt}x_p(t) = A_p x_p(t) + B_p K x_p(t). \quad (3)$$

Para a implementação da lei de controle (2) com TTC, assume-se que o valor de u permaneça constante entre os tempos de iterações, ou seja

$$u(t) = u(t_k) \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}[, k \in \mathbb{N} \quad (4)$$

e

$$t_{k+1} = t_k + T_s \quad \forall k \in \mathbb{N}, \quad (5)$$

em que T_s representa o período de amostragem e a sequência $\{t_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ o momento em que a lei de controle (2) é recalculada e o sinal do atuador atualizado (Heemels et al., 2014).

O algoritmo de ETC propõe que o cálculo de (2) e, portanto, a sequência de atualizações do sinal de controle sejam realizadas sempre que, e apenas nesses instantes, o desempenho do sistema segundo alguma métrica não seja satisfeito (Heemels et al., 2012).

Uma forma de definir o desempenho é utilizando a função de Lyapunov para a malha fechada (3)

$$V(x_p(t)) = x_p^T(t) P x_p(t), \quad (6)$$

em que P é uma matriz simétrica, positiva definida e satisfaz

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V(x_p(t)) &= \frac{\partial V}{\partial x_p(t)} (A_p + B_p K) x_p(t) \\ &= -x_p^T(t) Q x_p(t), \end{aligned} \quad (7)$$

em que Q é uma matriz positiva definida e define a taxa de decaimento de V . Se é tolerada uma taxa de decaimento mais lenta e utilizando uma restrição mais fraca, a condição é dada por

$$\frac{d}{dt}V(x_p(t)) \leq -\sigma x_p^T(t) Q x_p(t), \quad (8)$$

em que $\sigma \in [0, 1[$.

Logo, a lei de controle (2) é recalculada e o sinal enviado ao atuador atualizado quando a condição (8) deixa de ser satisfeita. Desta forma, o

erro e entre o estado em que o sinal de controle foi atualizado pelo ETC e estado atual é definido por

$$e(t) = x_p(t_k) - x_p(t) \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}[, k \in \mathbb{N}. \quad (9)$$

Com (9), a evolução do sistema em malha fechada entre amostragens é dada por

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x_p(t) &= A_p x_p(t) + B_p K x_p(t_k) \\ &= A_p x_p(t) + B_p K x_p(t_k) \\ &\quad + B_p K (x_p(t) - x_p(t_k)) \\ &= A_p x_p(t) + B_p K x_p(t) + B_p K e(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Então, substituindo (10) em (7), tem-se

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V(x_p(t)) &= \frac{\partial V}{\partial x_p} (A_p + B_p K) x_p(t) \\ &\quad + \frac{\partial V}{\partial x_p} B_p K e(t) \\ &= -x_p^T(t) Q x_p(t) + 2x_p^T(t) P B_p K e(t) \end{aligned} \quad (11)$$

e substituindo (11) em (8), tem-se

$$\begin{bmatrix} x_p^T(t) & e^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sigma - 1)Q & P B_p K \\ K^T B_p^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \leq 0. \quad (12)$$

Deste modo, t_k agora é definido como os momentos que

$$z^T(t_k) \Psi z(t_k) = 0, \quad (13a)$$

em que

$$z(t_k) = \begin{bmatrix} x_p(t_k) \\ e(t_k) \end{bmatrix} \quad (13b)$$

e

$$\Psi = \begin{bmatrix} (\sigma - 1)Q & P B_p K \\ K^T B_p^T P & 0 \end{bmatrix}. \quad (13c)$$

Assim, o algoritmo proposto por Heemels et al. (2012) verifica os instantes em que a condição (13a) deixa de ser satisfeita para então atualizar e enviar o sinal de controle. Estes instantes variam conforme a dinâmica da planta, fazendo com que a técnica de controle seja aperiódica.

Conforme Tabuada (2007), a condição (8) pode ser simplificada por

$$\|e(t)\|^2 \leq \sigma \|x_p(t)\|^2, \quad (14)$$

o que resulta na condição (13a) com Ψ dado por

$$\Psi = \begin{bmatrix} -\sigma I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (15)$$

em que I é uma matriz identidade.

Portanto, um NCS com ETC pode ser visto conforme ilustrado na Figura 2.

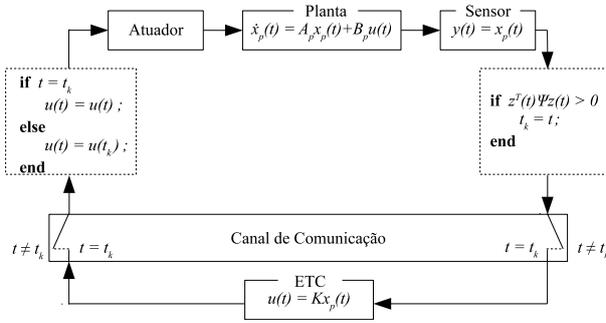


Figura 2: ETC em sistema de controle em rede.

Admite-se que o atuador mantenha o último sinal recebido até que seja atualizado e que o tempo entre envio e entrega de informações é desprezível.

3 Sistema de nível

A fim de verificar o funcionamento da técnica apresentada, foram realizadas simulações e ensaios experimentais em uma planta de nível. A planta de nível utilizada neste trabalho é o modelo XC220 fabricada pela EXSTO (Figura 3), composta por dois tanques, bomba, válvula manual e transmissor de pressão para medição de nível. A interface utilizada foi o NI Elvis II como conversor AD/DA e a execução do algoritmo de controle é feita em um computador.



Figura 3: Planta de Nível Exsto XC220. – Fonte: (Carvalho, 2015)

O processo pode ser representado pelo modelo não linear

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_i(t) - a\sqrt{2gh(t)}, \quad (16)$$

em que A é a seção transversal do tanque superior, a a seção transversal da tubulação de saída da planta q_i , a vazão de entrada, g a aceleração da gravidade e h o nível do líquido controlado. Esse modelo foi aproximado por uma função de transferência de primeira ordem, identificada de forma empírica pela resposta ao degrau em malha aberta (Figura 4) com sinal de comando de 2 [V], para

a válvula totalmente aberta e em uma faixa de operação de 2 a 18 [cm].

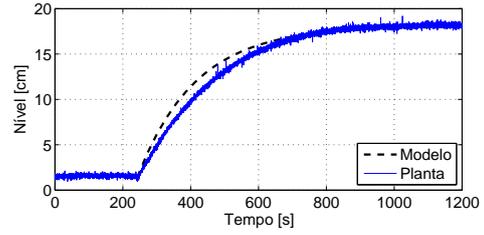


Figura 4: Resposta ao Degrau - Planta de Nível Exto XC220 e Modelo de Primeira Ordem.

A função de transferência que relaciona a tensão aplicada na bomba com a leitura do sensor é dada por

$$G(s) = \frac{1,64}{171,1s + 1} \frac{[V]}{[cm]}, \quad (17)$$

ou, equivalentemente,

$$G(s) = \frac{8,364}{171,1s + 1} \frac{[cm]}{[V]}, \quad (18)$$

quando a saída considerada é o nível do reservatório.

4 Projeto do ETC para o sistema de nível

Nesta seção será apresentada a metodologia de implementação para a introdução de referência e o cálculo dos ganhos do controlador.

4.1 Introdução de referência

O algoritmo proposto em Heemels et al. (2012) e seus resultados estão explicitados para a regulação de estados. Neste trabalho foram aplicadas referências do tipo degrau no sistema de nível com o objetivo de observar o funcionamento do algoritmo. Para que o sistema rastreie esse tipo de referência foi inserido um integrador. Desta forma, as matrizes utilizadas no projeto do controlador são dadas por

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ -C_p & 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

A lei de controle apresentada em (2) torna-se então

$$\hat{u}(t) = \hat{K} \hat{x}_p(t), \quad (20)$$

sendo

$$\hat{K} = [K \quad -K_i] \quad \text{e} \quad \hat{x}_p(t) = \begin{bmatrix} x_p(t) \\ \int_0^t (r(\tau) - y(\tau)) d\tau \end{bmatrix}, \quad (21)$$

em que K_i é o ganho do integrador, r é a referência de entrada e y a saída da planta.

4.2 Projeto do controlador e método de avaliação de desempenho

O vetor de ganhos \hat{K} é projetado utilizando-se o método do regulador linear quadrático (*Linear Quadratic Regulator* – LQR), no qual objetiva-se minimizar a função de custo

$$J = \int_0^{\infty} (\hat{x}_p^T(t)\hat{Q}\hat{x}_p(t) + \hat{u}^T(t)\hat{R}\hat{u}(t))dt, \quad (22)$$

em que \hat{Q} e \hat{R} são as ponderações dadas aos estados e ao consumo de energia, respectivamente.

Após sucessivas simulações, escolheu-se as ponderações \hat{Q} e \hat{R} como

$$\hat{Q} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \hat{R} = 3, \quad (23)$$

obtém-se o vetor de ganhos

$$\hat{K} = [-9 \quad 0,41]. \quad (24)$$

Para avaliar o desempenho das simulações e ensaios práticos utilizou-se o calculado da integral do erro quadrático (*Integral Squared Error* – *ISE*), dada por

$$ISE = \int (r(t) - y(t))^2 dt. \quad (25)$$

5 Simulações

Com auxílio do *software* MATLAB simulou-se as abordagens TTC, ou seja, controlador LQR convencional, e ETC com diferentes valores de σ . A condição utilizada para o ETC é dada por (14), a qual foi implementada em ambiente *Simulink*.

Como entrada de referência foram utilizados dois degraus de 5 [cm], intercalados de 200 [s]. O vetor de ganhos \hat{K} é o mesmo para as implementações TTC e ETC. O passo de simulação do TTC foi de 0,04 [s]. Ao sinal de leitura foi adicionado um ruído branco de medição com banda limitada e potência igual a 3×10^{-5} [W].

As Figuras 5, 6, 7, 8 e 9 apresentam a dinâmica da planta e o sinal de controle para a simulação do método TTC e para o método ETC com σ ajustado para 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} e 10^{-3} , respectivamente.

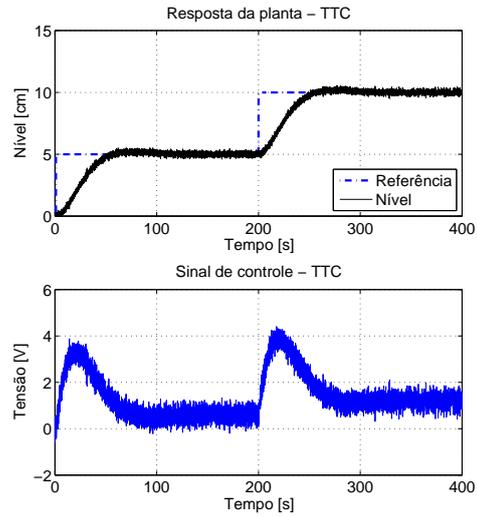


Figura 5: Simulação – Controle de nível – TTC.

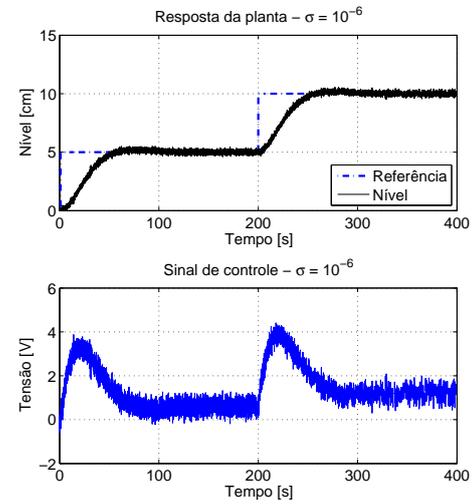


Figura 6: Simulação – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-6}$.

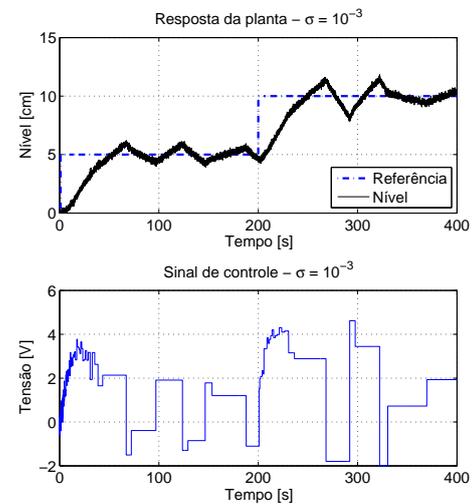


Figura 9: Simulação – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-3}$.

6 Resultados práticos

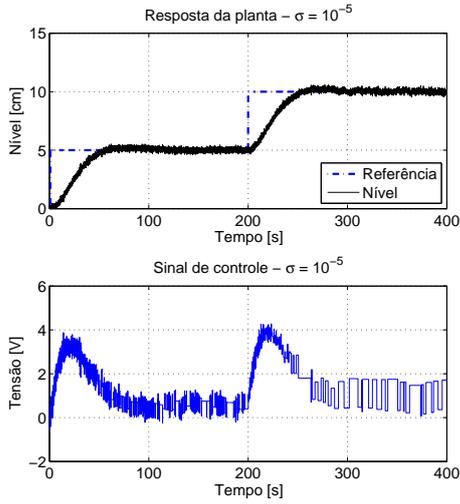


Figura 7: Simulação – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-5}$.

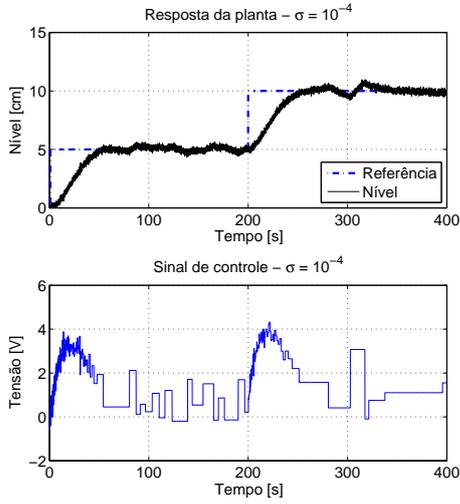


Figura 8: Simulação – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-4}$.

A Tabela 1 apresenta a comparação dos resultados apresentados para as simulações utilizando as implementações TTC e ETC, relacionando o valor de σ com a porcentagem de atualização do sinal de controle e o índice de desempenho.

Tabela 1: Comparação entre simulações

Valor de σ	% de atualização	ISE (10^3)
TTC	100	0,8818
10^{-6}	45,91	0,8819
10^{-5}	11,72	0,8879
10^{-4}	3,87	0,8900
10^{-3}	1,81	1,0343

As discussões a respeito dos resultados para as abordagens apresentadas serão expostas na Seção 6 junto aos resultados práticos obtidos para cada ensaio.

Semelhante às simulações, os ensaios práticos foram realizados para diferentes valores de σ e comparados à abordagem TTC. A condição utilizada para o ETC foi a apresentada em (14), a qual foi implementada em ambiente *LabVIEW*, e a aquisição de dados realizada com o auxílio da plataforma NI Elvis II.

A entrada de referência manteve-se igual ao implementado em simulação, sendo utilizado dois degraus de 5 [cm], intercalados de 200 [s]. O período de amostragem utilizado para a implementação TTC foi de 0,04 [s]. O vetor de ganhos \hat{K} é o mesmo para as implementações TTC e ETC. Nesta seção é realizada a análise do sinal de controle e a leitura do nível da planta.

A Figura 10 apresenta a dinâmica da planta e do sinal de controle utilizando o método de TTC, nota-se que neste ensaio a atualização do sinal de controle é realizada a cada período de amostragem.

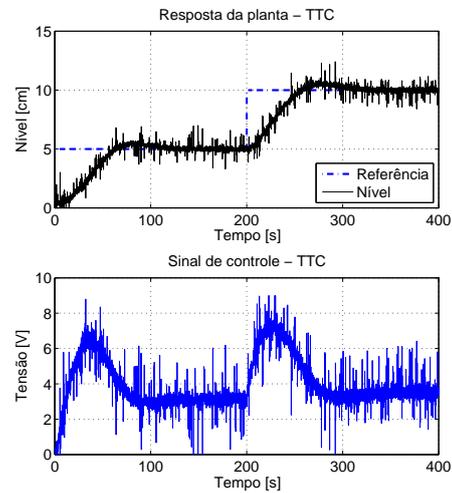


Figura 10: Ensaio – Controle de nível – TTC.

As Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam os resultados para a implementação do método ETC para $\sigma = 10^{-6}$, $\sigma = 10^{-5}$, $\sigma = 10^{-4}$ e $\sigma = 10^{-3}$, respectivamente.

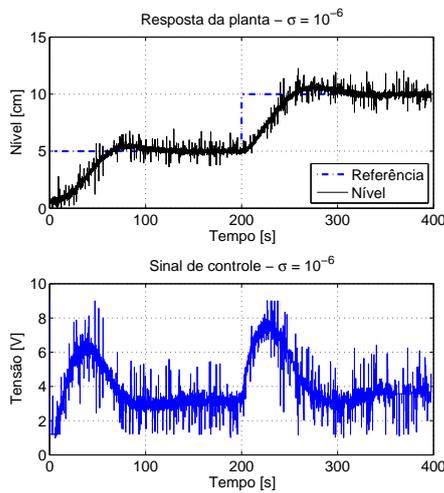


Figura 11: Ensaio – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-6}$.

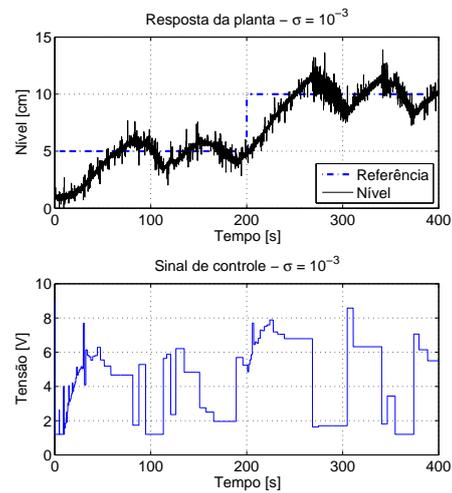


Figura 14: Ensaio – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-3}$.

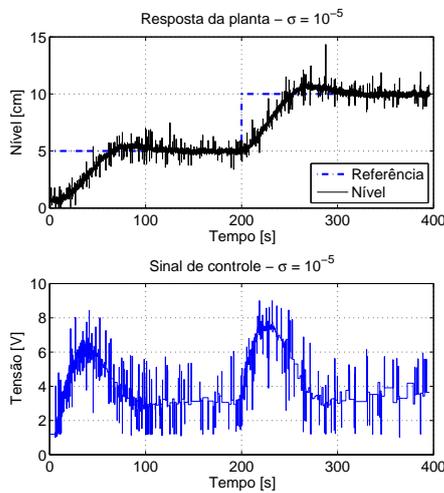


Figura 12: Ensaio – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-5}$.

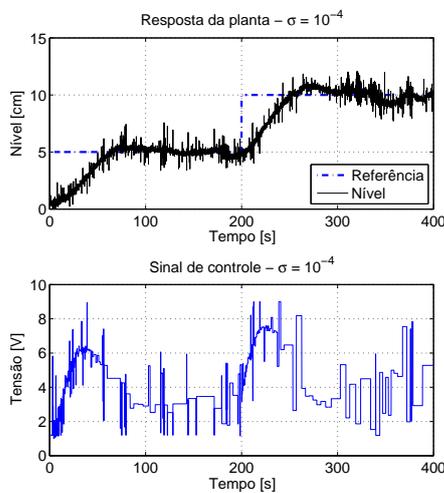


Figura 13: Ensaio – Controle de nível – ETC $\sigma = 10^{-4}$.

Em primeiro momento (Figura 11) é difícil notar os instantes em que o sinal de controle permanece constante, devido a grande quantidade de ruídos. Resultados quantitativos a cerca da comunicação e envio do sinal de controle serão apresentados posteriormente.

O ensaio com $\sigma = 10^{-5}$ (Figura 12) manteve resposta semelhante comparado ao anterior, entretanto, com um maior valor de σ os momentos de sinal de controle constantes são vistos mais facilmente, principalmente quando o nível atinge a referência.

Com o aumento de σ para 10^{-4} (Figura 13) a resposta da planta começa a apresentar variações que não ocorreram nos ensaios anteriores mas observadas em simulação. Devido a este aumento a condição de ETC ocorre menos vezes, como visto pelo sinal de controle. A menor quantidade de atualizações, somado aos ruídos de medição, refletem na qualidade da resposta da planta.

Para $\sigma = 10^{-3}$ (Figura 14) a resposta da planta possui consideráveis variações, ainda que em torno da referência, apresentando um comportamento diferente dos anteriores. Nota-se que para este caso é visível a ocorrência de menos atualizações até mesmo durante o transitório, momento em que o erro entre a resposta da planta e a referência aplicada é maior.

Nota-se que a planta seguiu a referência estipulada para os ensaios realizados, tendo maior variações conforme o aumento do valor de σ .

A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados práticos apresentados para os ensaios utilizando ETC, relacionando o valor de σ com a porcentagem de atualização do sinal de controle e o índice de desempenho.

Tabela 2: ETC – Comparação entre ensaios práticos

Valor de σ	% de atualização	ISE (10^3)
TTC	100	1,0837
10^{-6}	34,04	1,0790
10^{-5}	12,13	1,0783
10^{-4}	4,68	1,1172
10^{-3}	1,75	1,1713

Os ensaios com $\sigma = 10^{-6}$ e $\sigma = 10^{-5}$ possuíram índices de desempenho próximos aos do TTC e com economias relevantes em relação à comunicação. Deste modo, demonstra-se que quanto maior o parâmetro σ menos exigido é o canal de comunicação, o que implica de forma direta no desempenho da planta, conforme os resultados expostos.

Comparando as Tabelas 1 e 2 nota-se que existe considerável semelhança entre os resultados práticos e simulados. Por possuir característica quadrática, o índice de desempenho escolhido dá maior peso para erros maiores. Desta forma, os *spikes* devido aos ruídos de medição apresentados nos ensaios práticos fazem com que o ISE destes resultados sejam mais elevados que das simulações.

7 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma implementação prática do ETC em um sistema de nível. Os resultados experimentais foram condizentes com as simulações realizadas e indicaram uma economia considerável no cálculo e reenvio do sinal de controle, atingindo cerca de 85% sem prejuízos significativos ao desempenho. A variação do parâmetro de ajuste σ afeta diretamente na resposta da planta, além de diminuir o uso do canal de comunicação, como notado pelas simulações e resultados práticos. Assim, este estudo apresentou uma forma de contornar a limitação de banda atribuída ao canal de comunicação e viabilizar a utilização deste por diferentes malhas de controle. Em trabalhos futuros estuda-se implementar o algoritmo de ETC em conjunto com técnicas robustas a perdas de pacote.

8 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela CAPES – PROAP.

Referências

- Carvalho, L. (2015). *Manual de operação, instalação e manutenção – Controle de Nível, Vazão e Temperatura – XC220*, Exsto.
- Cucuzzella, M., Incremona, G. P. and Ferrara, A. (2016). Event-triggered sliding mode control

algorithms for a class of uncertain nonlinear systems: Experimental assessment, *American Control Conference (ACC)*, pp. 6549–6554.

- Demirel, B., Gupta, V. and Johansson, M. (2013). On the trade-off between control performance and communication cost for event-triggered control over lossy networks, *European Control Conference (ECC)*, pp. 1168–1174.
- Heemels, W. P. M. H., Johansson, K. H. and Tabuada, P. (2012). An introduction to event-triggered and self-triggered control, *Proc. IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 3270–3285.
- Heemels, W. P. M. H., Johansson, K. H. and Tabuada, P. (2014). *Event-Triggered and Self-Triggered Control*, Springer.
- Losada, M. G. (2013). *Contributions to Networked and Event-Triggered Control of Linear Systems*, Springer.
- Mazo, M. J., Anta, A. and Tabuada, P. (2010). An ISS self-triggered implementation of linear controllers, *Automatica* 46, pp. 1310–1314.
- Schenato, L., Sinopoli, B., Franceschetti, M., Poolla, K. and Sastry, S. S. (2007). Foundations of control and estimation over lossy networks, *IEEE Proc.*, pp. 163–187.
- Tabuada, P. (2007). Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks, *IEEE Tran. on Automatic Control*, pp. 1680–1685.
- van Eekelen, B., Rao, N., Khashoeei, B. A., Antunes, D. J. and Heemels, W. P. M. H. (2016). Experimental validation of an event-triggered policy for remote sensing and control with performance guarantees, *Second International Conference on Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP)*.