

SISTEMAS DE CONTROLE ACIONADO POR EVENTO BASEADO NA VARIÂNCIA DA SAÍDA E DO CONTROLE

CARLOS F. O. C NEVES*, UBIRAJARA F. MORENO*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PPGEAS)

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Caixa Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil

Emails: carlosoc@das.ufsc.br, moreno@das.ufsc.br

Abstract— The energy and communication bandwidth consumption are important considerations when it comes to triggering in networked control systems. Event-triggering techniques has been proposed to minimize the use of these resources. Thus, this paper proposes a new aperiodic transmission technique of information, based on the output and control variance for systems with noise in the sensor measure.

Keywords— Networked Control Systems, Event-Triggering Systems, Distributed Control.

Resumo— O consumo da energia e da largura de banda do meio de comunicação são considerações importantes quando se trata de acionamento em sistemas de controle via rede. Técnicas baseadas em acionamento por evento tem sido propostas para minimizar a utilização desses recursos. Nesse sentido, neste artigo é proposta uma nova técnica aperiódica de transmissão de informação, baseada na variância da saída e do controle para sistemas com ruído na leitura do sensor.

Palavras-chave— Sistemas de Controle via Rede, Sistemas de Acionamento por Evento, Controle Distribuído.

1 Introdução

Em Sistemas de Controle via Rede Distribuídos, constituídos por vários subsistemas acoplados fisicamente (agentes), existe a troca de informação através de uma rede de comunicação realizada pelas malhas de controle implementadas. Cada agente, formado por sensor, controlador, atuador e planta, realiza tarefas de amostragem da saída, cálculo do sinal de controle e atuação. Na maioria dos casos, este ciclo é realizado de forma periódica, considerando que a utilização do meio de comunicação pelas tarefas de cada agente é escalonável. Entretanto, diversas propostas aperiódicas têm surgido na literatura para reduzir a quantidade de mensagens enviadas pela rede, diminuindo, assim, o consumo de energia necessária nos nodos e mantendo um desempenho de processo aceitável.

A abordagem aperiódica, que implica em acionamento por evento, surge na literatura com o trabalho de Årzén (1999), cujo interesse é concentrado na tarefa de controle. Entretanto, diversas propostas têm surgido para estimação (Li and Lemmon, 2011). Outras técnicas de acionamento por evento têm sido desenvolvidas para sistemas lineares e não lineares como, por exemplo, *deadband sampling* e *integral deadband sampling* (Ploennigs et al., 2010), acionamento por evento para processos estocásticos (Rabi and Johansson, 2008) e abordagens baseadas em funções de Lyapunov (Mazo and Tabuada, 2008). Sistemas de controle acionado por evento distribuídos têm sido considerados em Wang and Lemmon (2011a) e sistemas incertos em Lehmann (2011). Outro método importante é o *self-triggering control*, in-

troduzido por Velasco et al. (2003), e tem sido aplicado em sistemas lineares e não-lineares como em Anta and Tabuada (2010). Recentemente, trabalhos têm sido realizados no campo do *minimum-attention control* (Wang and Lemmon, 2011b). Considerando perda de pacotes e atrasos na rede de comunicação, propostas aperiódicas podem ser aplicadas, assim como é apresentado por Lehmann and Lunze (2011). Em Araújo (2011) é apresentada uma técnica baseada no sinal de controle chamada *Control Input Sampling* (CIS), que diminui ainda mais a quantidade de acionamentos se comparada com as técnicas baseadas na saída ou estado da planta.

As técnicas existentes na literatura são limitadas em relação a redução de acionamentos quando é considerada a existência de ruídos na saída da planta. Além disso, durante o regime permanente, elas apresentam acionamentos esporádicos desnecessários já que a saída se encontra em determinada faixa de variância aceitável. Consequentemente, ao tentar relaxar as condições de acionamento para eliminar o efeito do ruído no número de mensagens enviadas pela rede, é possível que o regime transitório seja comprometido, dependendo da intensidade do ruído. Assim, neste trabalho é proposta uma técnica de acionamento por evento baseada na variância da saída da planta e do sinal de controle denominada AEBVSC, seguida de uma proposta modificada que agrega as vantagens desta com as vantagens da proposta CIS. A principal idéia da técnica AEBVSC é diminuir a ocorrência de eventos em regime permanente na presença de ruídos, evitando acionamentos que podem ser descartados.

Este artigo está organizado como segue. Na

seção 2 é apresentada a formulação do problema. A nova proposta de acionamento por evento é introduzida na seção 3. Na seção 4 é apresentada a descrição das simulações realizadas. Os resultados são encontrados na seção 5. Por fim, na seção 7 são apresentadas as conclusões.

2 Formulação do Problema

Considera-se um Sistema de Controle via Rede Distribuído formado por n agentes que podem ou não estar acoplados fisicamente e que podem ou não trocar informação com seus agentes vizinhos.

No exemplo da Figura 1, o Agente i , $i = \{1, 2, 3\}$, é um conjunto composto por um nodo sensor S_i , um nodo controlador C_i , um nodo atuador A_i e uma planta P_i . O envio de informação (linha tracejada) e o acoplamento físico (linha contínua) são realizados através dos sensores e das plantas, respectivamente. A equação de estado do Agente i é

$$\begin{aligned} x_i(t_{k+1}) &= f_i(x_i(t_k), u_{ci}(t_j)) \\ y_i(t_k) &= x_{yi}(t_k) + r_i(t_k) \\ u_{ci}(t_j) &= g_i(\hat{y}_i(t_j)) \\ x_i(t_0) &= x_{i0}, \forall t_k, t_j \geq t_0, \end{aligned}$$

onde x_i é o vetor de estados, u_{ci} é o vetor da entrada de controle, y_i é vetor da saída da planta, x_{yi} é o vetor de estados medidos, r_i é um ruído de média nula e variância v_r na saída medida, \hat{y}_i é o vetor da saída medida do último evento ocorrido, f_i é uma função não-linear, g_i é a lei de controle e x_{i0} é o vetor de estados no instante inicial t_0 .

Considera-se que cada agente somente pode medir o seu estado e receber informação de si mesmo e dos agentes vizinhos. Define-se por amostragem a tarefa periódica realizada pelos sensores em ler a saída da planta, e por acionamento a liberação do *broadcast* da informação medida caso ocorra um evento, ou seja, a violação de uma determinada condição dentro do gerador de eventos de cada sensor.

A sequência de instantes de tempo $t_{k=1}^{\infty}$ representa os instantes de amostragem e $t_{j=1}^{\infty}$ representa os instantes de acionamento. Considera-se, também, que os atrasos de transmissão são negligenciados e que não ocorrem perdas de pacotes.

O objetivo deste artigo é propor uma técnica de acionamento por evento capaz de reduzir, em regime permanente, a quantidade de acionamentos que ocorrem na presença de ruídos na saída da planta, mantendo nível de desempenho aceitável.

3 Proposta de Acionamento por Evento Baseada na Variância da Saída e do Controle

Observando a estrutura interna de cada agente, mostrada com mais detalhe na Figura 2, é possível

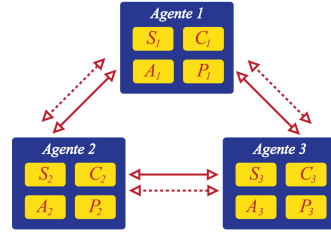


Figura 1: Topologia do Sistema de Controle via Rede Distribuído.

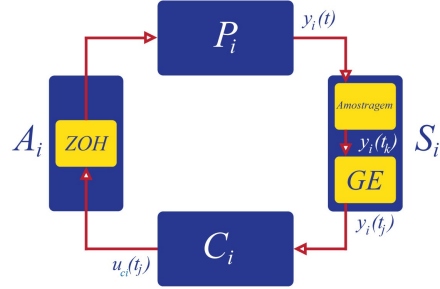


Figura 2: Estrutura interna de cada agente do Sistema de Controle via Rede Distribuído.

identificar que o nodo sensor S_i possui um módulo responsável por amostrar a saída $y_i(t)$ da planta P_i e um módulo responsável por liberar os acionamentos denominado Gerador de Eventos (GE). Este, dependendo da técnica de acionamento implementada, irá permitir o envio de $\hat{y}_i(t_j)$ para o nodo controlador C_i , o qual irá calcular o sinal de controle $u_{ci}(t_j)$ que será aplicado na planta P_i pelo atuador A_i . O atuador possui um módulo ZOH, *Zero-Order Hold* (Segurador de Ordem Zero) para manter o mesmo sinal de controle entre instantes de acionamento.

Diversas técnicas de acionamento existentes na literatura podem ser implementadas no GE. Entretanto, o objetivo de propor uma técnica de acionamento para reduzir a quantidade de eventos em regime permanente, motivou o desenvolvimento de uma proposta baseada na variância da saída e do controle.

3.1 Acionamento por Evento Baseado na Variância da Saída e do Controle (AEBVSC)

A principal ideia da técnica AEBVSC é considerar o efeito da variância do estado estacionário da saída da planta e da variável de controle na condição de acionamento.

Em Aström and Wittenmark (1997) é utilizada uma estratégia de controle denominada *Minimum-Variance Control* (Controle de Variância Mínima) que minimiza a função custo dada por

$$J_{1q} = E(y^2(t_k)) + \rho E(u^2(t_k)), \quad (1)$$

onde $E(y^2(t_k))$ e $E(u^2(t_k))$ são as variâncias da saída e do controle, respectivamente, e ρ é uma constante positiva de ponderação.

A nova condição de acionamento, a qual é implementada no módulo GE dos nodos sensores, é baseada em (1) para decidir se os mesmos irão realizar ou não o *broadcast* da informação das plantas para os seus respectivos nodos controladores, resultando em

$$\alpha_i \hat{\sigma}_{y_i}^2(t_k) + \beta_i \hat{\sigma}_{u_{si}}^2(t_k) \geq \gamma_i, \quad (2)$$

onde $\hat{\sigma}_{y_i}^2$ é a variância da saída y_i da planta P_i , $\hat{\sigma}_{u_{si}}^2$ é a variância do sinal de controle u_{si} ; α_i , β_i e γ_i são parâmetros de projeto, sendo que, $\alpha_i + \beta_i = 1$.

Os parâmetros α_i e β_i são ajustados de acordo com a necessidade de priorizar a variância da saída ou do controle. O parâmetro γ_i é o limiar do esquema de acionamento, ou seja, limita ou relaxa a condição. Assim, se a condição (2) for verdadeira para o Agente i , então, o nodo sensor S_i envia informação para o nodo controlador C_i , onde um novo sinal de controle será calculado e aplicado na planta P_i pelo nodo atuador A_i .

O controle u_{si} utilizado na condição de acionamento pode não ser o mesmo que é calculado no nodo controlador C_i , ou seja, u_{si} é calculado por um controlador Proporcional-Integral (PI) implementado no módulo GE do nodo sensor S_i , exigindo que a referência \bar{x}_i esteja disponível neste. A forma discretizada do PI para o Agente i , utilizando a aproximação de Euler no termo integral, é dada por

$$\begin{aligned} x_{ci}(t_k + 1) &= x_{ci}(t_k) + \Delta T e_i(t_k) \\ u_{si}(t_k) &= K_{P_i} e_i(t_k) + K_{I_i} x_{ci}(t_k), \end{aligned} \quad (3)$$

onde $e_i(t_k) = \bar{x}_i(t_k) - y_i(t_k)$ é o erro entre a referência \bar{x}_i e a saída amostrada $y_i(t_k)$ da planta P_i , K_{P_i} é o ganho proporcional, $K_{I_i} = \frac{1}{T_{I_i}}$ é o ganho integral sendo T_{I_i} o tempo de integração, $\Delta T = t_k - t_{k-1}$ é o período entre os instantes de amostragem consecutivos e x_{ci} é o estado integral do controlador.

É necessário que a desigualdade em (2) seja calculada em tempo real, ou seja, a verificação da condição deve ser realizada a cada instante t_k de amostragem do sensor S_i . Sendo assim, é de grande interesse utilizar uma janela de tempo de tamanho ω para limitar o cálculo da média e da variância. De acordo com Isermann (2006), as médias da saída e do controle para um conjunto de N elementos são dadas por

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{y_i}(N) &= \frac{1}{\omega} \sum_{k=N-\omega+1}^N y_i(k) \\ \hat{\mu}_{u_{si}}(N) &= \frac{1}{\omega} \sum_{k=N-\omega+1}^N u_{si}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

e a variância pode ser calculada por

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{y_i}^2(N) &= \frac{1}{\omega-1} \sum_{k=N-\omega+1}^N (y_i(k) - \hat{\mu}_{y_i})^2 \\ \hat{\sigma}_{u_{si}}^2(N) &= \frac{1}{\omega-1} \sum_{k=N-\omega+1}^N (u_{si}(k) - \hat{\mu}_{u_{si}})^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Aplicando a forma recursiva em (4) e (5) no instante k , tem-se

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{y_i}(k) &= \hat{\mu}_{y_i}(k-1) + \frac{1}{\omega} [y_i(k) - y_i(k-\omega)] \\ \hat{\mu}_{u_{si}}(k) &= \hat{\mu}_{u_{si}}(k-1) + \frac{1}{\omega} [u_{si}(k) - u_{si}(k-\omega)], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{y_i}^2(k) &= \hat{\sigma}_{y_i}^2(k-1) + \frac{1}{\omega-1} [\hat{\sigma}_{y_i}^2(k) - \hat{\sigma}_{y_i}^2(k-\omega)] \\ &\quad - 2\delta_{y_i}(k) \frac{\omega-1}{\omega} \hat{\mu}_{y_i}(k-1) - \frac{\omega-1}{\omega^2} \delta_{y_i}^2(k) \\ \hat{\sigma}_{u_{si}}^2(k) &= \hat{\sigma}_{u_{si}}^2(k-1) + \frac{1}{\omega-1} [\hat{\sigma}_{u_{si}}^2(k) - \hat{\sigma}_{u_{si}}^2(k-\omega)] \\ &\quad - 2\delta_{u_{si}}(k) \frac{\omega-1}{\omega} \hat{\mu}_{u_{si}}(k-1) - \frac{\omega-1}{\omega^2} \delta_{u_{si}}^2(k), \end{aligned} \quad (7)$$

onde

$$\begin{aligned} \delta_{y_i}(k) &= \hat{\mu}_{y_i}(k) - \hat{\mu}_{y_i}(k-\omega) \\ \delta_{u_{si}}(k) &= \hat{\mu}_{u_{si}}(k) - \hat{\mu}_{u_{si}}(k-\omega). \end{aligned}$$

Portanto, no esquema AEBVSC são executadas as seguintes etapas para o Agente i :

1. Realiza-se a amostragem da saída $y_i(t)$ da planta P_i ;
2. Calcula-se o sinal de controle $u_{si}(t_k)$ através de (3);
3. Calcula-se a variância da saída $\hat{\sigma}_{y_i}^2$ e do controle $\hat{\sigma}_{u_{si}}^2$ através das equações (6) e (7);
4. Verifica-se a condição de acionamento em (2);
5. Realiza-se o *broadcast* da informação da planta caso a condição (2) seja verdadeira.

3.2 Acionamento por Evento Baseado na Variância da Saída e do Controle Modificado (AEBVSCM)

É esperado que a técnica AEBVSC seja eficaz no que diz respeito a redução de acionamentos em regime permanente. Entretanto, durante o regime transitório, os acionamentos ocorrem de forma periódica na taxa de amostragem do sensor. Uma forma de diminuir a quantidade de amostras no transitório é conjugar a condição de acionamento em (2) e o esquema de acionamento da técnica CIS descrita em Araújo (2011) dada por

$$|u(t_j) - u(t_k)| \geq \varepsilon, t_k \geq t_j, \quad (8)$$

onde $u(t_j)$ é o último sinal de controle aplicado na planta pelo atuador no instante t_j , $u(t_k)$ é o sinal de controle calculado pelo controlador implementado no sensor no instante t_k , e ε é parâmetro de projeto.

Assim, a técnica AEBVSCM agrega a vantagem da técnica AEBVSC de reduzir acionamentos no regime permanente e a vantagem da técnica CIS de gerar eventos aperiódicos durante o regime transitório, utilizando a nova condição de acionamento dada por

$$\begin{aligned} \alpha_i \hat{\sigma}_{y_i}^2(t_k) + \beta_i \hat{\sigma}_{u_{si}}^2(t_k) &\geq \gamma_i \\ |u_{si}(t_j) - u_{si}(t_k)| &\geq \varepsilon_i. \end{aligned} \quad (9)$$

Se, e somente se, as duas desigualdades em (9) implementadas nos sensores de cada agente forem verdadeiras, então o *broadcast* é liberado.

Portanto, o esquema AEBVSCM executa as seguintes etapas para o Agente i :

1. Realiza-se as etapas 1, 2 e 3 da técnica AEBVSC;
2. Verifica-se a condição de acionamento em (9);
3. Realiza-se o *broadcast* da informação da planta P_i caso a condição (9) seja verdadeira.

4 Simulações

O objetivo das simulações é comparar as novas técnicas propostas com a técnica CIS, para verificar se existe a redução da quantidade de acionamentos em regime permanente, considerando ruídos na saída da planta.

Para isso, utiliza-se o modelo representado na Figura 3, baseado em Johansson (2000), que descreve o sistema não-linear multivariável constituído de quatro tanques com água. Os estados do modelo são os níveis $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ e $x_4(t)$ dos tanques T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , respectivamente. As variáveis de controle são os fluxos de entrada $u_1(t) = k_u v_1$ proporcionados pela bombas 1 e $u_2(t) = k_u v_2$ proporcionado pela bombas 2, onde k_u é a constante das bombas; v_1 e v_2 são as tensões nelas aplicadas. Os fluxos de entrada são divididos em duas direções por duas válvulas. As porcentagens de abertura λ_1 e λ_2 das válvulas são consideradas parâmetros do sistema. A água flui do tanques T_2 e T_4 para os tanques T_3 e T_1 , respectivamente, e destes para um reservatório. O objetivo de controle é estabilizar as saídas $y_1(t) = x_1(t)$ e $y_2(t) = x_3(t)$ nas referências $\bar{x}_1(t)$ e $\bar{x}_3(t)$ desejadas.

Aplicando a Lei de Torricelli nos fluxos de saída de cada tanque, a dinâmica do modelo da Figura 3 pode ser expressa por

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g_c u(t), \quad (10)$$

onde

$$f(x(t)) = \begin{bmatrix} -\frac{a_1 \sqrt{2gx_1}}{A_1} + \frac{a_4 \sqrt{2gx_4}}{A_1} \\ -\frac{a_2 \sqrt{2gx_2}}{A_2} \\ -\frac{a_3 \sqrt{2gx_3}}{A_3} + \frac{a_2 \sqrt{2gx_2}}{A_3} \\ -\frac{a_4 \sqrt{2gx_4}}{A_4} \end{bmatrix},$$

$$g_c = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1}{A_1} & 0 \\ \frac{1-\lambda_1}{A_2} & 0 \\ 0 & \frac{\lambda_2}{A_3} \\ 0 & \frac{1-\lambda_2}{A_4} \end{bmatrix},$$

$g = 981 \text{ cm/s}^2$ é a aceleração da gravidade, A_i ($i = 1, \dots, 4$) é a seção transversal dos tanques e a_i ($i = 1, 2$) é a seção transversal dos orifícios de escoamento. Cada equação em (10) representa a

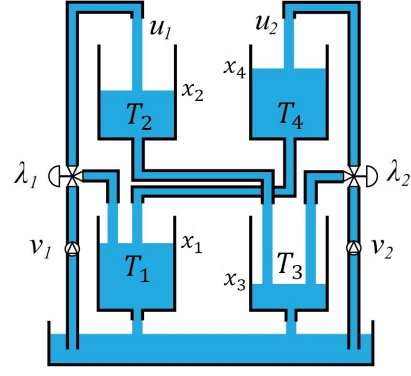


Figura 3: Modelo não linear de quatro tanques.

variação de volume de cada tanque em função das vazões que nele entram e saem.

Os valores dos parâmetros utilizados nas simulações são $A_{1,4} = 28 \text{ cm}^2$, $A_{2,3} = 32 \text{ cm}^2$, $a_{1,4} = 0.071 \text{ cm}^2$, $a_{2,4} = 0.057 \text{ cm}^2$, $k_u = 0.8 \text{ ml/Vs}$, $\lambda_1 = 0.7 \%$ e $\lambda_2 = 0.6 \%$.

Define-se que o modelo em questão é dividido em duas plantas. A planta P_1 é composta pelos tanques T_1 e T_2 , e a planta P_2 é composta pelos tanques T_3 e T_4 . O conjunto formado por P_1 e seus respectivos sensor S_1 , controlador C_1 e atuador A_1 define o agente Agente 1; o conjunto formado por P_2 e seus respectivos sensor S_2 , controlador C_2 e atuador A_2 define o Agente 2.

A estratégia de controle escolhida para ser implementada nos nodos controladores é a do PIDPLUS, proposto por Song et al. (2006) para lidar com perdas de pacotes e atrasos na rede, que é um PID modificado que pode ser utilizado em abordagens aperiódicas, evitando problemas como, o efeito *sticking*, que ocorre quando nenhuma transmissão do sensor é enviada para o controlador; e oscilações na saída, ou seja, oscilações em torno da referência a ser seguida. Considerando que o termo derivativo é descartado, Araújo (2011) representa um PIDPLUS na estrutura tradicional do PI, que, para o controlador C_i do Agente i , resulta em uma variável de estado x_{Ii} dada por

$$x_{Ii}(\Delta T) = \frac{K_{Pi}}{K_{Ii}} (1 - e^{-\frac{K_{Ii}}{K_{Pi}} \Delta T}), \quad (11)$$

onde $x_{Ii}(\Delta T)$ é zerado toda vez que um evento é gerado e um acionamento é liberado. A análise de estabilidade do controlador PIDPLUS pode ser observada com mais detalhe em Song et al. (2006).

A ferramenta utilizada para realizar as simulações foi o *toolbox* TrueTime do MATLAB, permitindo simular Sistemas de Controle via Rede, que no caso, é composto por 6 nodos, sendo 2 sensores, 2 controladores e 2 atuadores que utilizam uma rede do tipo CAN (Controller Area Network). A transmissão de dados ocorre a uma taxa de 800000 bits/s. Os sensores realizam a leitura da saída da planta e a verificação da condição de aci-

Tabela 1: Parâmetros dos controladores PI e PID-PLUS.

Controlador	Nodo	Parâmetros
PI	S_1	$K_{P1} = 3 ; T_{I1} = 30$
	S_2	$K_{P2} = 2.7 ; T_{I2} = 40$
PIPLUS	C_1	$K_{P1} = 3 ; T_{I1} = 30$
	C_2	$K_{P2} = 2.7 ; T_{I2} = 40$

onamento com um período de tempo de $\Delta t = 0.1$ segundos. As simulações realizadas tem duração de $t = 1200$ segundos, com mudança de referência no instante $t = 0$ segundos e perturbação de carga de 3.2 ml/Vs no instante $t = 600$ segundos.

O tamanho da janela de tempo utilizada para calcular a média e a variância nas condições de acionamento é $\omega = 100$ segundos. As condições iniciais dos estados do modelo de quatro tanques são $x_{10}(0) = 12 \text{ cm}$, $x_{20}(0) = 2.1246 \text{ cm}$, $x_{30}(0) = 8 \text{ cm}$ e $x_{40}(0) = 0.5383 \text{ cm}$; e deseja-se que as saídas $y_1(t)$ e $y_2(t)$ sigam as referências $\bar{x}_1(t) = 17 \text{ cm}$ e $\bar{x}_3(t) = 13 \text{ cm}$, respectivamente, considerando um ruído de média nula de variância $v_r = 0.0001$. Os parâmetros dos controladores PI utilizados no gerador de eventos dos sensores e dos controladores PIDPLUS utilizados nos nodos controladores são dados na Tabela 1.

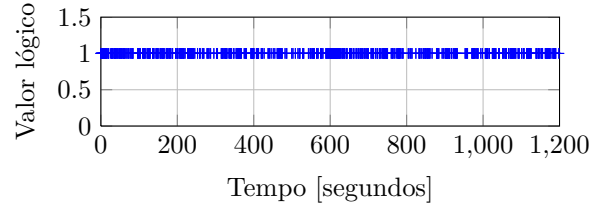
A técnica AEBVSC foi simulada com os parâmetros $\alpha_i = 0.99$ e $\beta_i = 0.01$, $i = 1, 2$; $\gamma_1 = 0.0006$ e $\gamma_2 = 0.0004$. A técnica CIS foi simulada com o parâmetro $\varepsilon_i = 0.075$, $i = 1, 2$. Os mesmos valores de parâmetros das técnicas AEBVSC e CIS foram utilizados na técnica AEBVSCM.

5 Análise dos Resultados

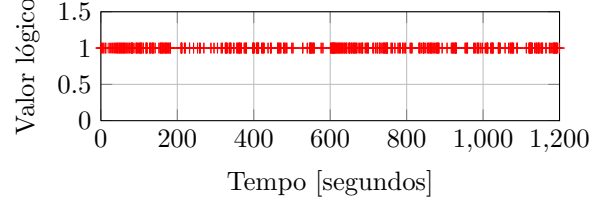
Os resultados das técnicas AEBVSC e AEBVSCM foram comparados com a técnica CIS. O desempenho de controle é avaliado segundo a medida IAE (*Integral Absolute Error*) e o desempenho das técnicas de acionamento é verificado com base na quantidade total de acionamentos N_a . O nível lógico 1 nas Figuras 4, 5 e 6 indica a ocorrência de acionamento.

É possível observar na Tabela 2 que a técnica CIS é melhor em relação ao desempenho de controle. Além disso, a técnica AEBVSC apresenta IAE aceitável com quantidade de acionamento bem maior do que a técnica CIS, pois realiza os acionamentos de forma periódica com taxa igual a taxa de amostragem do sensor durante o regime transitório.

Analisando a Figura 5, é observado que nenhum acionamento ocorre durante o regime permanente utilizando a técnica AEBVSC. Já na simulação utilizando a técnica CIS, acionamentos ocorrem durante regime permanente devido a presença do ruído na saída, assim como é mostrado na Figura 4.

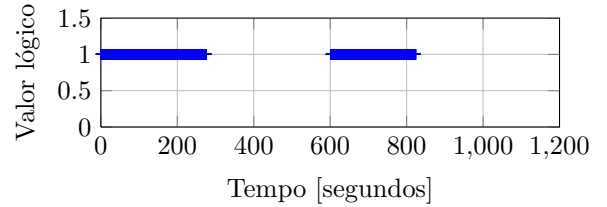


(a) Acionamentos do sensor S_1 .

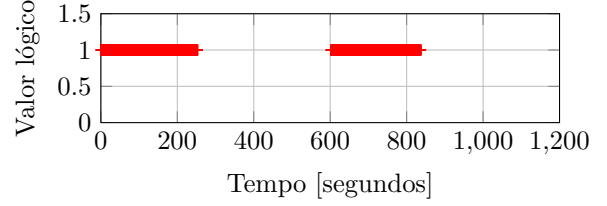


(b) Acionamentos do sensor S_2 .

Figura 4: Acionamentos do sensor S_1 (a) e do sensor S_2 (b) utilizando a técnica CIS.

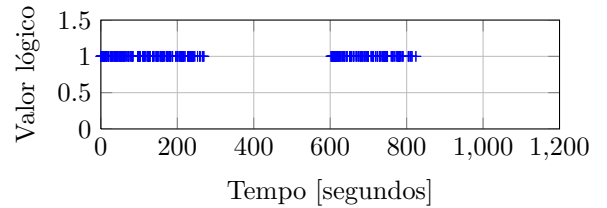


(a) Acionamentos do sensor S_1 .

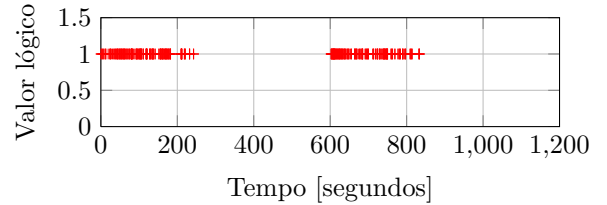


(b) Acionamentos do sensor S_2 .

Figura 5: Acionamentos do sensor S_1 (a) e do sensor S_2 (b) utilizando a técnica AEBVSC.



(a) Acionamentos do sensor S_1 .



(b) Acionamentos do sensor S_2 .

Figura 6: Acionamentos do sensor S_1 (a) e do sensor S_2 (b) utilizando a técnica AEBVSCM.

Tabela 2: Medida de desempenho de controle IAE e quantidade total de acionamentos N_a .

Técnica	IAE		N_a
	Tanque T_1	Tanque T_3	
Periódico	219.6846	229.6912	24000
CIS	223.6468	232.9133	1799
AEBVSC	227.3571	236.7944	9862
AEBVSCM	231.2081	244.3759	843

Na Tabela 2, a técnica AEBVSCM é a que apresenta menor quantidade de acionamentos com desempenho de controle aceitável. Isso se deve ao efeito da técnica CIS no transitório e ao efeito da técnica AEBVSC no permanente, assim como é mostrado na Figura 6.

6 Conclusões

O objetivo deste artigo é propor uma técnica de acionamento por evento capaz de reduzir a quantidade de acionamentos durante o regime permanente, considerando a existência de ruídos na saída da planta e mantendo desempenho de controle aceitável.

Diante disso, foi desenvolvido uma técnica baseada na variância da saída da planta e do sinal de controle denominada AEBVSC. Além disso, foi realizada uma modificação desta técnica adicionando a condição de acionamento utilizada na técnica CIS, resultando na técnica AEBVSCM.

O objetivo do trabalho foi alcançado, pois, através dos resultados obtidos, as técnicas AEBVSC e AEBVSCM são melhores que a técnica CIS, pois, apresentam menor quantidade de acionamentos em regime permanente e pouco comprometimento do desempenho de controle, quando ruídos na saída são considerados.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil.

Referências

- Anta, A. and Tabuada, P. (2010). To sample or not to sample: Self-triggered control for nonlinear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **55**(9): 2030–2042.
- Araújo, J. (2011). *Design and Implementation of Resource-Aware Wireless Networked Control Systems*, PhD thesis, KTH School of Electrical Engineering.
- Åström, K. J. and Wittenmark, B. (1997). *Computer-Controlled Systems*, 3^a edn, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Johansson, K. H. (2000). The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **8**(3): 456–465.
- Lehmann, D. (2011). *Event-based state-feedback control*, PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum.
- Lehmann, D. and Lunze, J. (2011). Extension and experimental evaluation of an event-based state-feedback approach, *Control Engineering Practice* **19**(2): 101–112.
- Li, L. and Lemmon, M. D. (2011). Performance and average sampling period of sub-optimal triggering event in event triggered state estimation, *IEEE Conference on Decision and Control*.
- Mazo, M. and Tabuada, P. (2008). On event-triggered and self-triggered control over sensor/actuator networks, *47th IEEE Conference on Decision and Control* pp. 435–440.
- Ploennigs, J., Vasyutynskyy, V. and Kabitzsch, K. (2010). Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **6**(3): 416–424.
- Rabi, M. and Johansson, K. H. (2008). Event-triggered strategies for industrial control over wireless networks, *In International Conference on Wireless Internet* pp. 1–7.
- Årzén, K. E. (1999). A simple event-based pid controller, *14th World Congress of IFAC*.
- Song, J., Mok, A. K., Chen, D., Nixon, M., Blevins, T. and Wojsznis, W. (2006). Improving pid control with unreliable communications, *ISA EXPO Technical Conference*.
- Velasco, M., Fuertes, J. and Martí, P. (2003). The self triggered task model for real-time control systems, *24th IEEE Real-Time Systems Symposium* pp. 67–70.
- Wang, X. and Lemmon, M. D. (2011a). Event-triggering in distributed networked control systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **56**(3): 586–601.
- Wang, X. and Lemmon, M. D. (2011b). Minimum attention controllers for event-triggered feedback systems, *IEEE Conference on Decision and Control - European Control Conference*.