DOI: 10.48011/asba.v2i1.1470

Minimização do número de transmissões em controle discreto com amostragem por evento

Mateus Alves Ribeiro Belo * **Ana Paula Batista** **
Eduardo Nunes Gonçalves **

* *Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, MG (e-mail: mateus.alves.belo@gmail.com)*
** *Departamento de Engenharia Elétrica, CEFET-MG, MG (e-mails: ana@cefetmg.br, eduardong@cefetmg.br)*

Abstract: This work presents a multiobjective formulation for the design of event-triggered control in order to obtain different tradeoffs between the tracking error and the number of transmissions of feedback and control signals. The multiobjective differential evolution optimization algorithm is applied to obtain a set of efficient solutions that determine the individual parameters for signal transmission of each sensor and actuator. Four strategies are evaluated to define when the signals from the sensors and actuators should be transmitted or not. The proposed design methodology and the different strategies for implementing the event-triggered control are evaluated using an example of a multivariable control system with two sensors and two actuators. It is clear that the proposed design methodology is quite efficient with a considerable reduction in the number of transmissions without loss of performance of the control system.

Resumo: Este trabalho apresenta uma formulação multiobjetivo para o projeto de sistemas de controle com acionamento por evento com objetivo de obter diferentes compromissos entre o erro de rastreamento e o número de transmissões dos sinais de realimentação e de controle. É aplicado o algoritmo de otimização evolução diferencial multiobjetivo para a obter um conjunto de soluções eficientes que determinam os parâmetros individuais para transmissão dos sinais de cada sensor e atuador. São avaliadas quatro estratégias para definição de quando os sinais do sensores e atuadores devem ser transmitidos ou não. A metodologia de projeto proposta e as diferentes estratégia para implementação do sistema de controle com acionamento por evento são avaliadas por meio de um exemplo de sistema de controle multivariável com dois sensores e dois atuadores. Fica claro que a metodologia de projeto proposta é bastante eficiente com redução considerável no número de transmissões sem perda do desempenho do sistema de controle.

Keywords: Event-triggered control systems; multiobjective optimization; multiobjective differential evolution algorithm.

Palavras-chaves: Sistemas de controle com amostragem por evento; otimização multiobjetivo; algoritmo evolução diferencial multiobjetivo.

1. INTRODUÇÃO

Os recentes avanços em computação e tecnologias de comunicação levaram a um crescente interesse por sistemas fisicamente distribuídos com comunicação e controle via rede de dados, sobretudo a Internet. Nesta classe de sistemas, a troca de informações entre os componentes, tais como sensores, controladores e atuadores, é realizada através de uma rede de comunicação de dados. Uma grande variedade de problemas e aplicações relacionadas a IoT (*Internet of Things*), NCS (*Networked Control Systems*), WNCS (*Wireless Networked Control Systems*) e sensores inteligentes tem sido foco de pesquisas recentes na literatura (Batista and Jota, 2018; Chen et al., 2019; Park et al., 2018; Zhao et al., 2020; Xie et al., 2019). Neste contexto, o estudo de estratégias de controle com acionamento por eventos que visem minimizar o número de transmissões dos sinais, sejam eles de medição ou de controle, tornam-se interessante para integrar a estas aplicações. A ideia é transmitir a informação somente quando necessário seja para economia do uso da rede de comunicação bem como para a economia de energia (Hu et al., 2012).

Diversos trabalhos na literatura abordam estratégias de controle com acionamento por evento (ETC, do inglês *Event-triggered control*), sendo este um paradigma de controle digital em que a execução das tarefas de controle (a amostragem da saída da planta e atualização do sinal de controle) ocorrem em condições específicas (Borgers and Heemels, 2014). O controle acionado por evento é reativo e

* Os autores agradecem os apoios das agências CAPES, CNPq e FAPEMIG.

gera amostragem do sensor e atuação do controle quando, por exemplo, o estado da planta se desvia mais do que um determinado limite do valor desejado (Heemels et al., 2012). Outra abordagem neste contexto que tem sido foco de pesquisas recentes são as estratégias de controle autoacionado (STC, do inglês *Self-triggered control*), que é um controle proativo, no qual a próxima instância de amostragem ou atuação é calculada com antecedência (Heemels et al., 2012; Akashi et al., 2016).Vários trabalhos consideram também o acionamento por evento somente dos sensores, agrupados segundo uma lei quadrática (Zhang and Han, 2017).

A contribuição deste trabalho é propor uma metodologia de projeto de sistema de controle discreto com amostragem por evento, baseado em controlador já existente, com objetivo de minimizar o numero de transmissões dos sinais do sensor para o controlador e do controlador para o atuador, preservando a estabilidade e o desempenho do sistema de controle. Dado um controlador que atende as especificações de desempenho, deseja-se determinar os valores a serem fixados dos limiares ótimos dos detectores de eventos de cada sensor e atuador individualmente. O problema é formulado como um problema de otimização multiobjetivo de tal modo que, através de qualquer algoritmo de otimização evolutivo multiobjetivo, é possível obter um conjunto de soluções eficientes com diferentes compromissos entre o desempenho do sistema e o número de transmissões. São comparadas quatro opções diferentes de detecção de evento, projetadas pela metodologia proposta, através de simulações numéricas de um sistemas de controle multivariável com duas entradas e duas saídas, totalizando 4 elementos do sistema de controle. É importante ressaltar que, o interesse deste estudo é futura aplicação em NCS, onde restrições adicionais (devido a inclusão da rede na malha de controle) deverão ser consideradas, tais como os efeitos dos atrasos variantes, perdas de pacote, perdas de sincronização, reordenamento de pacotes, entre outras.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Considere o diagrama de blocos do sistema de controle discreto com amostragem por evento apresentado na Figura 1. É considerado que tanto o controlador como os sensores possuem período de amostragem regular, T_s, e que os instantes de envio das mensagens do sensor para o controlador e do controlador para o atuador são determinados pelos blocos detectores de evento (DE). O bloco sistema inclui os atuadores e sensores. O sistema é modelado em tempo discreto no espaço de estados como:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_w w(k) + B_u \bar{u}(k), \\ y(k) &= Cx(k) + D_w w(k), \end{aligned} \tag{1}$$

sendo $x(k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ o vetor de estados do sistema, $w(k) \in \mathbb{R}^{n_w}$ o vetor de entradas exógenas (sinais de referência, $r(k) \in \mathbb{R}^q$, distúrbios, $d(k) \in \mathbb{R}^v$, e ruídos de medição, $n(k) \in \mathbb{R}^q$), $y(k) \in \mathbb{R}^q$ o vetor de saídas medidas e $\bar{u}(k) \in \mathbb{R}^p$ o vetor de variáveis manipuladas, cujos sinais possuem amostragem por evento:

$$\bar{u}_i(k) = \begin{cases} u_i(k) & \text{se } \psi_i(k) \geq \delta_i, \\ \bar{u}_i(k-1) & \text{se } \psi_i(k) < \delta_i, \end{cases} \tag{2}$$

$i = 1, \ldots, p$, sendo $\psi(k)$ a lei de transmissão para as variáveis manipuladas, que pode ter diferentes escolhas como será discutido a frente, e δ_i o limiar que determina em qual instante de amostragem a informação do controlador é enviada para o atuador. Caso o limiar δ_i não seja atingido, a informação do controlador não é transmitida e o i-ésimo atuador mantém o valor da variável manipulada igual ao último valor recebido.

O controlador dinâmico em tempo discreto, com período de amostragem regular, T_s, é modelado no espaço de estados por:

$$\begin{aligned} x_c(k+1) &= A_c x_c(k) + B_c[r(k) - \bar{y}(k)], \\ u(k) &= C_c x_c(k) + D_c[r(k) - \bar{y}(k)], \end{aligned} \tag{3}$$

sendo $x_c(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ o vetor de estados do controlador, $r(k) \in \mathbb{R}^q$ o vetor de sinais de referência, $u(k) \in \mathbb{R}^p$ o vetor de ação de controle e $\bar{y}(k) \in \mathbb{R}^q$ o vetor de variáveis medidas com amostragem por evento:

$$\bar{y}_j(k+1) = \begin{cases} y_j(k) & \text{se } \varphi_j(k) \geq \rho_j, \\ \bar{y}_j(k) & \text{se } \varphi_j(k) < \rho_j, \end{cases} \tag{4}$$

$j = 1, \ldots, q$, sendo $\varphi(k)$ a lei de transmissão para as variáveis de saída medidas, que pode ter diferentes escolhas como será visto a frente, e ρ_j o limiar que determina em qual instante de amostragem a informação do sensor é enviada para o controlador. Caso o limiar ρ_j não seja atingido, o valor medido pelo j-ésimo sensor não é transmitido para o controlador que considera que a j-ésima variável medida permanece no último valor recebido.

Serão avaliados quatro possibilidades para as leis de transmissão dos blocos DE:

Lei 1, erro absoluto:

$$\begin{aligned} \psi_i(k) &= |u_i(k) - \bar{u}_i(k-1)|, \\ \varphi_j(k) &= |y_j(k) - \bar{y}_j(k-1)|. \end{aligned} \tag{5}$$

Lei 2, erro ao quadrado:

$$\begin{aligned} \psi_i(k) &= [u_i(k) - \bar{u}_i(k-1)]^2 \\ \varphi_j(k) &= [y_j(k) - \bar{y}_j(k-1)]^2. \end{aligned} \tag{6}$$

Lei 3, integral do erro absoluto:

$$\begin{aligned} \psi_i(k) &= \psi_i(k-1) + T_s|u_i(k) - \bar{u}_i(k-1)|, \\ \varphi_j(k) &= \varphi_j(k-1) + T_s|y_j(k) - \bar{y}_j(k-1)|. \end{aligned} \tag{7}$$

Lei 4, integral do erro ao quadrado:

$$\begin{aligned} \psi_i(k) &= \psi_i(k-1) + T_s[u_i(k) - \bar{u}_i(k-1)]^2 \\ \varphi_j(k) &= \varphi_j(k-1) + T_s[y_j(k) - \bar{y}_j(k-1)]^2. \end{aligned} \tag{8}$$

$i = 1, \ldots, p$, $j = 1, \ldots, q$, sendo T_s o período de amostragem. Nas leis 3 e 4, cada vez que o limiar de amostragem é verificado, resultando na transmissão da informação, a integral numérica é reinicializada igual a zero.

Considere-se o problema de otimização multiobjetivo (POM):

$$\begin{aligned} &\mathcal{X}^* = \{\chi^* \in \mathbb{R}^\eta \mid \chi^* = \arg\min_{\chi} \mathbf{f}(\chi)\} \\ &\text{sujeito a: } \chi \in \mathcal{F}_x, \end{aligned} \tag{9}$$

sendo $\mathbf{f}(\cdot) \; : \; \mathbb{R}^\eta \mapsto \mathbb{R}^m$ o vetor de objetivos do problema e $\mathcal{F}_x \subset \mathbf{R}^\eta$ a região factível. Os vetores $\chi \in \mathbb{R}^\eta$ são os vetores de parâmetros do POM. Os vetores $f(\chi) \in \mathbb{R}^m$ encontram-se num espaço de objetivos. Deseja-se determinar o conjunto $\mathcal{X}^*$ denominado conjunto de soluções eficientes ou conjunto Pareto-Ótimo, $\mathcal{X}^* \subset \mathcal{F}_x$.

Para definição do conceito de dominância, a seguinte notação é empregada para vetores em $\mathbb{R}^m$:

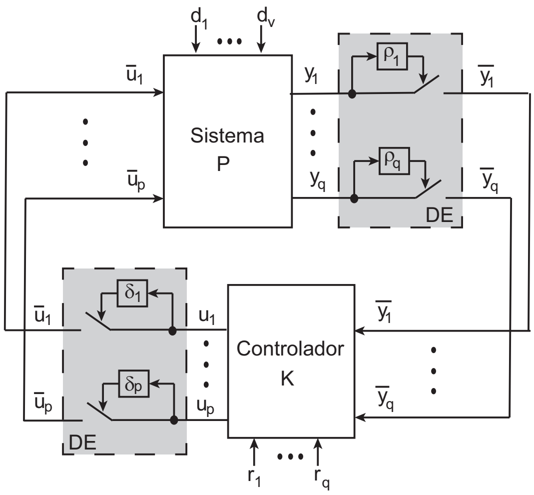

Figura 1. Diagrama de blocos do sistema de controle usando rede com amostragem por evento.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} \leq \mathbf{y} &\Rightarrow \{x_i \leq y_i,\ i = 1, \ldots, m\}, \\ \mathbf{x} \neq \mathbf{y} &\Rightarrow \{\exists i \mid x_i \neq y_i\}. \end{aligned} \tag{10}$$

Uma solução χ_1 domina uma solução χ_2 se $f(\chi_1) \leq f(\chi_2)$ e $f(\chi_1) \neq f(\chi_2)$, isto é, χ_1 não é pior que χ_2 em nenhum objetivo e é melhor em pelo menos um objetivo.

Diz-se que $\chi^* \in \mathcal{F}_x$ é uma solução Pareto-ótima (ou eficiente ou não-dominada) do problema de otimização multiobjetivo, $\chi^* \in \mathcal{X}^*$, se não existe $\chi \in \mathcal{F}_x$ tal que $f(\chi) \leq f(\chi^*)$ e $f(\chi) \neq f(\chi^*)$, ou seja, se χ^* não é dominada por nenhuma outra solução factível.

Para o projeto do sistema de amostragem por evento, os parâmetros de otimização são os limiares das leis de amostragem: $\chi = [\delta_1, \ldots, \delta_p,\ \rho_1, \ldots, \rho_q]^T$, com $\eta = p + q$. São consideradas duas funções objetivos a serem minimizadas. A primeira é o critério de desempenho integral do erro absoluto (IAE, *Integral Absolute Error*):

$$f_1 = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{q} [|e_j(k)| + |e_j(k-1)|], \tag{11}$$

sendo $e_j(k) = r_j(k) - y_j(k)$ o erro de rastreamento e $n_k T_s$ o tempo final de simulação. A segunda função objetivo é o somatório do número total de transmissões de cada sensor e atuador, $f_2 = N_t$. Cada vez que um sensor ou um atuador atinge o limiar de transmissão então $N_t = N_t + 1$. A região factível $\mathcal{F}_x$ é definida pelas restrições $0 \leq \delta_i \leq \bar{\delta}_i$, $i = 1, \ldots, p$, e $0 \leq \rho_j \leq \bar{\rho}_j$, $j = 1, \ldots, q$, sendo $\bar{\delta}_i$ e $\bar{\rho}_j$ os valores máximos definidos pelo projetista para concentrar as soluções na região de interesse.

Nota: também foi estudado adotar o critério de desempenho integral do erro ao quadrado (ISE, *Integral Square Error*) para f_1, mas nossa escolha foi baseada em uma melhor distribuição da curva de Pareto resultante das duas opções.

3. ALGORITMO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL MULTIOBJETIVO

O algoritmo Evolução Diferencial é um algoritmo de otimização evolucionário para solução de problemas com funções com domínio real (Storn and Price, 1997). O algoritmo Evolução Diferencial possui os mesmos operadores de algoritmos evolucionários padrões: mutação, cruzamento e seleção.

Seja $\mathcal{U}_{(a,b)}$ um número pseudo-aleatório com distribuição uniforme no intervalo (a, b); $\mathcal{I}_{(m)}$ um número pseudo-aleatório com distribuição uniforme no intervalo $[1, m]$; $\chi \in \mathbb{R}^\eta$ o vetor de variáveis de otimização, $\eta = p \times q$; e N o número de indivíduos da população. Defina a população na k-ésima iteração, $X_k = \{\chi_{k,i};\ i = 1, \ldots, N\}$, sendo a i-ésima solução:

$$\chi_{k,i} = \begin{bmatrix} \chi_{k,i,1} \\ \vdots \\ \chi_{k,i,\eta} \end{bmatrix}. \tag{12}$$

Os operadores do DE são descritos a seguir.

3.1 População Inicial

A população inicial é distribuída de forma aleatória uniforme nos intervalos $0 \leq \delta_i \leq \bar{\delta}_i$, $i = 1, \ldots, p$, e $0 \leq \rho_j \leq \bar{\rho}_j$, $j = 1, \ldots, q$.

3.2 Mutação diferencial

Considere os índices $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ dados por $r_j = \mathcal{I}_{(N)}$, $j = 1, ..., 3$. Adotamos que a i-ésima solução mutante é obtida como sendo:

$$\mathbf{v}_{k,i} = \chi_{k,r_1} + F_i(\chi_{k,r_2} - \chi_{k,r_3}), \tag{13}$$

$i = 1, \ldots, N$. Adotamos o fator de escala aleatório para cada mutação, sendo $F_i = \mathcal{U}_{(0{,}5,1)}$

3.3 Cruzamento

O cruzamento entre as i-ésimas soluções da k-ésima população, X_k, e da população mutante, V_k, gera a população tentativa, U_k:

$$u_{k,i,j} = \begin{cases} v_{k,i,j}, & \text{se } \mathcal{U}_{(0,1)} \leq C_r \text{ ou } j = \mu_i, \\ \chi_{k,i,j}, & \text{caso contrário,} \end{cases} \tag{14}$$

para $j = 1, \ldots, \eta$, $i = 1, \ldots, N$, sendo $C_r \in [0, 1]$ a taxa de cruzamento. Adotamos $C_r = 0{,}5$. O índice $\mu_i = \mathcal{I}_{(\eta)}$ garante que $\mathbf{u}_{k,i} \neq \chi_{k,i}$.

3.4 Tratamento das restrições

Neste trabalho, optamos por forçar que toda solução pertença a $\mathcal{F}_x$ utilizando o método de reflexão, isto é, refletir a variável em relação ao valor mínimo ou máximo quando $\delta_i < 0$ ou $\delta_i > \bar{\delta}_i$, $i = 1, \ldots, p$, e $\rho_j < 0$ ou $\rho_j > \bar{\rho}_j$, $j = 1, \ldots, q$.

3.5 Seleção

A diferença entre o método evolução diferencial escalar e o multiobjetivo (DEMO, *Differential Evolution Multiobjective*) ocorre na operação de seleção (Robič and Filipič, 2005). A operação de seleção determina qual solução, se o alvo, $\chi_{k,i}$, e/ou a tentativa, $\mathbf{u}_{k,i}$, sobrevive para próxima geração. Para $i = 1, \ldots, N$:

$$\chi_{k+1,i} = \begin{cases} \mathbf{u}_{k,i}, & \text{se } f(\mathbf{u}_{k,i}) \text{ domina } f(\chi_{k,i}) \\ \chi_{k,i}, & \text{caso contrário} \end{cases}, \tag{15}$$

Se $f(\chi_{k,i})$ não dominar $f(\mathbf{u}_{k,i})$ então $\mathbf{u}_{k,i}$ é incluída a mais na próxima geração, isto é, $\mathcal{X}_{k+1} = \mathcal{X}_{k+1} \cup \mathbf{u}_{k,i}$. No caso de serem acrescentadas soluções além do tamanho N da população, é necessário reduzir o número de soluções para N aplicando a técnica de seleção do método NSGA-II ilustrada na Figura 2. Inicialmente as soluções são ordenadas em fronteiras. A primeira fronteira, F_1, candidata a fronteira Pareto ótima, é composta pelas soluções não dominadas, a segunda fronteira, F_2, pelas soluções não dominadas após retirar a soluções de F_1 e assim por diante até não haver mais soluções. Se o limite N ocorrer dentro de uma fronteira, é necessário calcular o índice de aglomeração de cada solução para selecionar as soluções mais espalhadas no espaço de funções objetivo.

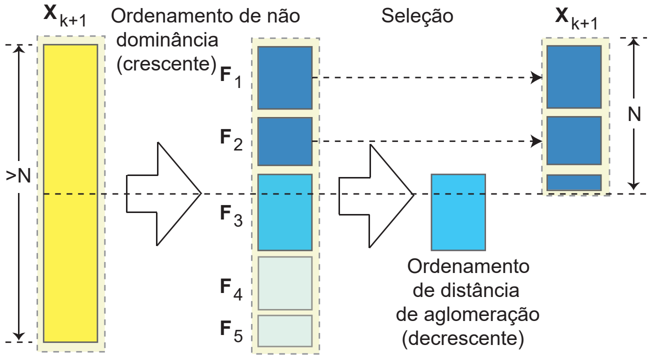

Figura 2. Seleção por ordenamento de não dominância.

3.6 Critério de parada

Adotamos como critério de parada um número máximo de gerações, N_g.

4. EXEMPLO ILUSTRATIVO

Considere o sistema de controle de nível de quatro tanques apresentado na Figura 3 (Johansson, 2000). Considerando o ponto de operação de fase mínima, este sistema pode ser representado por um modelo linear invariante no tempo no espaço de estados:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{62} & 0 & \frac{1}{23} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{90} & 0 & \frac{1}{30} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{30} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \frac{0,7.3,33}{28} & 0 \\ 0 & \frac{0,6.3,35}{32} \\ 0 & \frac{0,4.3,35}{28} \\ \frac{0,3.3,33}{32} & 0 \end{bmatrix} u(t) \tag{16}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t)$$

sendo as variáveis de estado os níveis de cada tanque, $x = [h_1\ h_2\ h_3\ h_4]^T$, e as variáveis manipuladas as tensões aplicadas as bombas, $u = [v_1\ v_2]^T$.

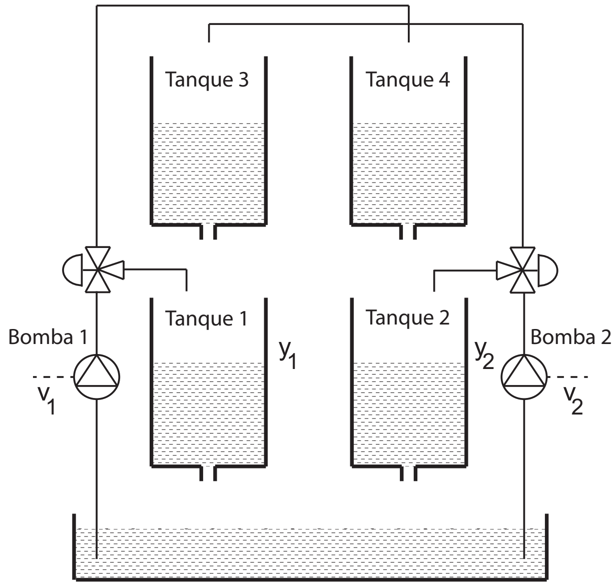

Figura 3. Sistema de controle de nível de quatro tanques.

Tabela 1. Comparação entre as leis de amostragem para um limite do IAE

	f_2			
f_1	Lei 1	Lei 2	Lei 3	Lei 4
$\leq$ 16,0	997	1.283	460	838

É considerado um controlador PI descentralizado para sistema em tempo contínuo com os seguintes ganhos: $K_{p,1} = 6{,}52$; $T_{i,1} = 1/0{,}0328$; $K_{p,2} = 4{,}2949$ e $T_{i,2} = 1/0{,}0276$. O controlador é discretizado com $T_s = 0{,}5s$, considerando segurador de ordem zero, de modo a reproduzir o transitório do sistema em tempo contínuo.

Para este sistema, no cálculo das funções objetivos, adotou-se o tempo de simulação de $t_f = 1.200s$ para que tanto o erro de regime estacionário quanto o número de transmissões em regime estacionário tenham influência mais significativa nos resultados. Considere que $\mathbf{1}(t-\tau)$ é o sinal degrau unitário no instante τ, isto é, $\mathbf{1}(t-\tau) = 0$ para $t < \tau$ e $\mathbf{1}(t-\tau) = 1$ para $t \geq \tau$. São considerados os seguintes sinais de referência, $r_1(t) = \mathbf{1}(t)$ e $r_2(t) = \mathbf{1}(t - t_f/2)$. Os parâmetros adotados para o DEMO foram: $N = 20$ e $N_g = 10.000$. Os valores dos limiares, adotados por procedimento de tentativa e erro, são: $\bar{\delta}_1 = 0{,}1$, $\bar{\delta}_2 = 0{,}1$, $\bar{\rho}_1 = 0{,}01$ e $\bar{\rho}_2 = 0{,}01$.

A Figura 4 apresenta as soluções candidatas pareto-ótimo para as quatro leis de transmissão avaliadas. Claramente a lei de transmissão 3, baseada em integral do erro absoluto, apresenta soluções mais eficientes que as demais leis. A Tabela 1 apresenta o número de transmissões necessárias para cada lei de transmissão para garantir que a integral do erro de rastreamento absoluto não seja maior que 16. Para o sistema amostrado tradicional, com $T_s = 0,5s$, $T_f = 1.200s$, $p = 2$ e $q = 2$, seriam necessárias $f_2 = N_t = 9.600$ transmissões. Todas as estratégias resultam em economia considerável para o uso da rede de transmissão de dados mesmo para resultados com baixo valor de IAE.

Comparando os resultados das respostas transitórias obtidas pelas diferentes leis de transmissão, observa-se que as leis baseadas nos valores instantâneos, casos 1 e 2,

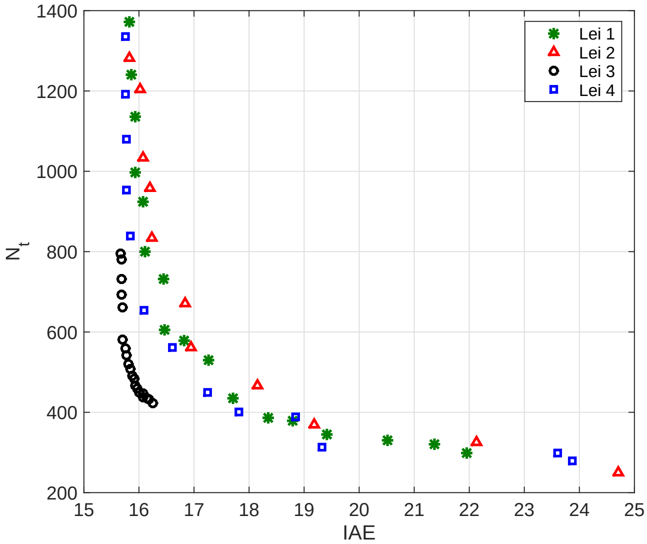

Figura 4. Soluções candidatas pareto-ótimo para as quatro leis de amostragem.

podem ocasionar pequenos erros de regime estacionário, que são funções dos limiares adotados, mas praticamente sem ocorrências de transmissão em regime estacionário. Seja $e_{ss,i} = r_i(\infty) - y_i(\infty)$, $i = 1, 2$. As duas soluções extremas da lei de transmissão 1 resultam, para N_t = 1961, $e_{ss,1}$ = 0,0000, $e_{ss,2}$ = 0,0001 e para N_t = 298 $e_{ss,1}$ = −0,0011, $e_{ss,2}$ = −0,0041. Já as leis de transmissão baseadas em integral, casos 3 e 4, podem levar a um ciclo limite de pequena amplitude mas que gera transmissões mesmo em regime estacionário, como será visto a seguir.

Mesmo a solução com menor numero de transmissões para a lei de transmissão 3, N_t = 422, com $[\rho_1\ \rho_2\ \delta_1\ \delta_2]$ = [0,0098 0,0100 0,0472 0,0341], apresenta uma resposta transitória similar a do sistema amostrado tradicional como mostrado nas Figuras 5 e 6. Ao se ampliar a resposta de regime estacionário, é verificado a presença de um ciclo limite de amplitude pequena. Apesar disso, o erro de rastreamento obtido foi menor para o sistema amostrado por evento, IAE = 16,2531, do que a do sistema com amostragem periódica, IAE = 16,4780.

A Figura 7 apresenta os gráficos dos intervalos de transmissão individuais para cada um dos quatro elementos do sistema de controle, considerando o projeto com menor número de transmissões da lei de transmissão 3, N_t = 422. Nessa figura, valor zero significa que não ocorreu transmissão naquela amostragem e valor diferente de zero significa que ocorreu uma transmissão sendo o valor relativo ao número de amostragens sem transmissão no intervalo entre duas transmissões. Como informado, como o sistema entra em um ciclo limite, mesmo em regime estacionário continuam ocorrendo transmissões.

5. CONCLUSÕES

Foi proposto nesse trabalho uma formulação multiobjetivo para o projeto de sistemas de controle com amostragem por evento com objetivo de obter diferentes compromissos entre o erro de rastreamento e o número de transmissões do sensor para o controlador e do controlador para o

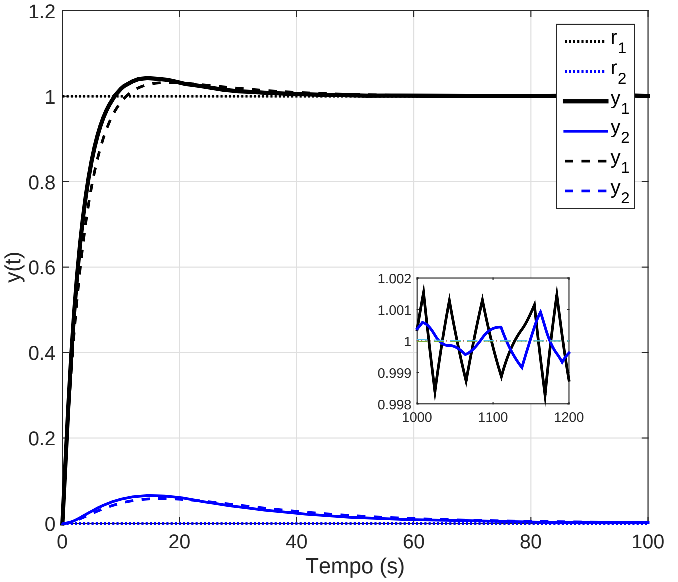

Figura 5. Respostas transitórias das saídas, $0 \leq t \leq 100$, para o menor número de transmissões da lei de transmissão 3 (contínuo) e amostragem tradicional (tracejado).

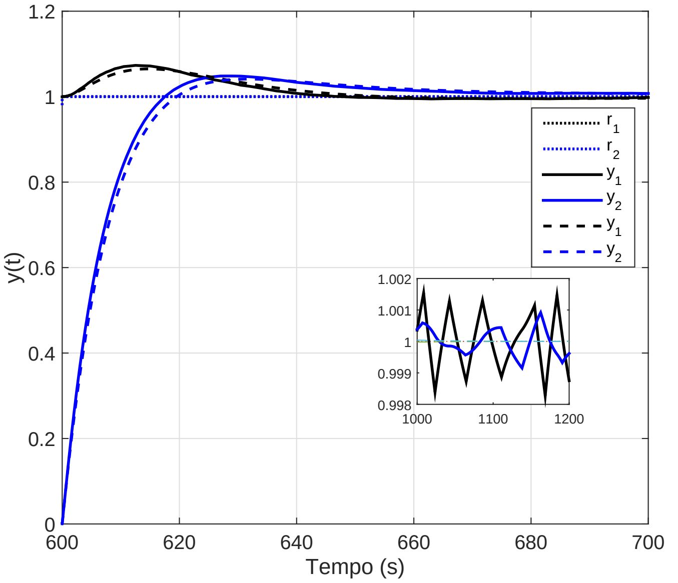

Figura 6. Respostas transitórias das saídas, $600 \leq t \leq 700$, para o menor número de transmissões da lei de transmissão 3 (contínuo) e amostragem tradicional (tracejado).

atuador. Foi aplicado o algoritmo de otimização evolução diferencial multiobjetivo para solução do problema. Foram avaliadas quatro leis de transmissão para implementação do sistema de controle por amostragem por evento. Para o sistema de controle estudado, considerando simulações que não incluem problemas adicionais de sistemas de controle em rede, foi observado que a lei de transmissão baseada em integral da variação absoluta do sinal a ser transmitido resulta no melhor compromisso entre os dois

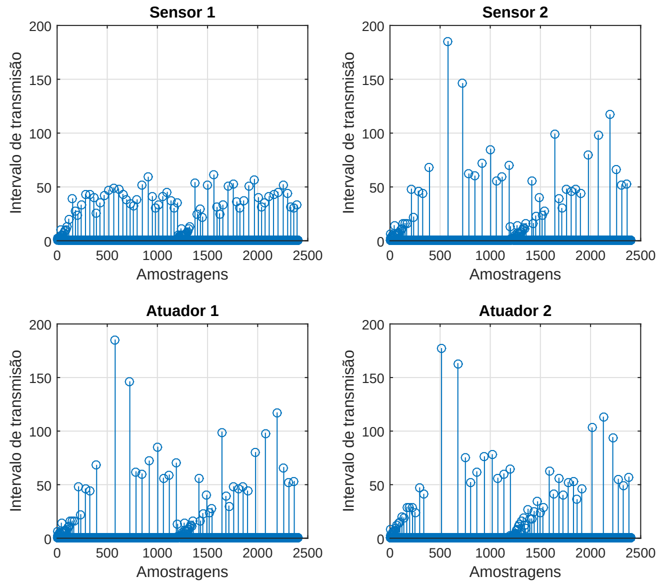

Figura 7. Intervalo entre amostragens para cada elemento do sistema de controle para o menor número de transmissões da lei de amostragem 3.

objetivos. Foi observado que essa estratégia de controle amostrado por evento resulta em um pequeno ciclo limite com ocorrências de transmissões em intervalo de tempo em que o sistema estaria em regime estacionário caso fosse considerado um sistema de controle com amostragem periódica. Porém, a amplitude deste ciclo limite é pequena pode não ser significativa em muitos sistemas práticos. A partir deste trabalho, podem ser avaliadas outros tipos de lei de transmissão e ser incluído na pesquisa outros problemas que afetam sistemas de controle que utilizam redes de comunicação.

REFERÊNCIAS

Akashi, S., Ishii, H., and Cetinkaya, A. (2016). Self-triggered control for communication reduction in networked systems. *IFAC*, 49(22), 280–285.

Batista, A.P. and Jota, F. (2018). Analysis of the most likely regions of stability of an ncs and design of the corresponding event-driven controller. *International Journal of Automation and Computing*, 15(1), 39–51.

Borgers, D.P.N. and Heemels, W.P.M.H.M. (2014). Event-separation properties of event-triggered control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(10), 2644–2656.

Chen, Y., Li, M., Chen, P., and Xia, S. (2019). Survey of cross-technology communication for iot heterogeneous devices. *IET Communications*, 1709–1720.

Heemels, W., Johansson, K., and Tabuada, P.X. (2012). An introduction to event-triggered and self-triggered control. *Conference on Decision and Control*, 3270–3285.

Hu, S., Zhang, Y., and Du, Z. (2012). Network-based $\mathcal{H}_\infty$ tracking control with event-triggering sampling scheme. *IET Control Theory & Applications*, 6(4), 533–544.

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.

Park, P., Ergen, S.C., Fischione, C., Lu, C., and Johansson, K.H. (2018). Wireless network design for control systems: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2), 978–1013.

Robič, T. and Filipič, B. (2005). Differential evolution for multiobjective optimization. In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, 520–533. Springer.

Storn, R. and Price, K. (1997). Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.

Xie, X., Li, S., and Xu, B. (2019). h_∞ control for networked control systems with an adaptive event-triggered scheme under stochastic sampling. *Chinese Control Conference*, 5274–5279.

Zhang, X.M. and Han, Q.L. (2017). Event-triggered $\mathcal{H}_\infty$ control for a class of nonlinear networked control systems using novel integral inequalities. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27, 679–700.

Zhao, L.N., Ma, H., Xu, L.X., and Wang, X. (2020). Observer-based adaptive sampled-data event-triggered distributed control for multi-agent systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67, 97–101.