

# Síntese conjunta do controlador e dos mecanismos de transmissão por evento em sistemas de controle via rede

Marcelo Ferreira Godinho\* Mateus Alves Ribeiro Belo\*  
Ana Paula Batista\*\* Eduardo Nunes Gonçalves\*\*

\* Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica  
UFSJ/CEFET-MG, MG (e-mails: godinhomar@hotmail.com,  
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 multi-objective formulation for the co-design of controller and event-triggered transmission mechanisms, with sampling period optimization, for networked control systems in order to obtain different tradeoffs between the control system performance and the communication network usage. Random transmission delays and packet loss are considered for each independent communication link. An improved version of the multi-objective differential evolution optimization algorithm is applied to obtain a set of efficient solutions that simultaneously determine the gains of the multivariable proportional-integral controller, the sampling period, and the individual parameters of the decentralized event-triggered transmission mechanisms of each sensor and actuator. The proposed co-design methodology is evaluated through an example of a multivariable control system with two sensors and two actuators. Based on the achieved results, it is evident that the proposed synthesis methodology is quite efficient with considerable reduction in the number of transmissions with equivalent control system performance.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma formulação multi-objetivo para a síntese conjunta de controlador e mecanismos de transmissão com acionamento por evento, com otimização do período de amostragem, para sistema de controle via rede com objetivo de obter diferentes compromissos entre o desempenho do sistema de controle e o uso da rede de comunicação de dados. São considerados atrasos aleatórios de transmissão e perda de pacotes para cada conexão de comunicação independente. É aplicada uma versão aperfeiçoada do algoritmo de otimização evolução diferencial multiobjetivo para a obter um conjunto de soluções eficientes que determinam simultaneamente os ganhos do controlador proporcional-integral multivariável, o período de amostragem e os parâmetros individuais dos mecanismos de transmissão por evento descentralizados de cada sensor e atuador. A metodologia de projeto conjunto proposta é avaliada por meio de um exemplo de sistema de controle multivariável com dois sensores e dois atuadores. Baseado nos resultados obtidos, fica evidente que a metodologia de síntese proposta é bastante eficiente com redução considerável no número de transmissões com desempenho do sistema de controle equivalente.

*Keywords:* Optimization in Control and Automation systems; networked control systems, event-triggered mechanisms; multi-objective optimization.

*Palavras-chaves:* Otimização em sistemas de controle e automação; sistemas de controle via rede; mecanismos de acionamento por evento; otimização multi-objetivo.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Existem sistemas de controle em que os elementos, sensores, controladores e atuadores, estão fisicamente distribuídos. Para esse tipo de sistema, o uso de redes de comunicação traz muitos benefícios relacionados ao custo de implantação e manutenção e à maior flexibilidade para modificações. Sistemas de controle em que seus elemen-

tos são integrados via rede de comunicação de dados são conhecidos como sistemas de controle via rede (NCS, do inglês *Networked Control Systems*) (Bemporad et al., 2010; Batista and Jota, 2018). Se por um lado os NCSs possuem diversas vantagens, por outro lado existem desafios tais como atrasos variáveis aleatórios na comunicação via rede, perda de pacotes, congestionamento da rede e necessidade de sincronismo entre os dispositivos (Baillieul and Antsaklis, 2007; Heemels et al., 2010). Devido à limitação de largura de banda e a demanda crescente do uso das redes de comunicação, uma questão importante a ser conside-

---

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

rada no projeto de NCS é a minimização do uso da rede de comunicação sem afetar o desempenho do sistema de controle. Uma das alternativas para minimização do uso da rede é considerar o controle acionado por evento (ETC, do inglês, *event-triggered control*) (Tabuada, 2007). No ETC, o controlador atualiza o valor da ação de controle e a envia ao atuador somente quando necessário, o que é detectado por meio do mecanismo de disparo por evento (ETM, do inglês *Event-triggered mechanism*). Uma outra possibilidade é considerar ETMs aplicados nas transmissões entre sensores e controladores e entre controladores e atuadores. Para evitar que os sensores tenham que verificar continuamente os sinais de saída para identificar a necessidade de transmissão, pode-se considerar controle por acionamento por evento periódicos (PETC, do inglês, *Periodic Event-triggered Control*) (Heemels et al., 2013; Dolk et al., 2017; Luo et al., 2021; Coutinho and Palhares, 2021). No PETC, os sinais de saída são medidos periodicamente de acordo com um período de amostragem fixo e o controlador discreto também atualiza as variáveis manipuladas com base no período de amostragem, mas os sinais só são transmitidos via rede de acordo com as regras estabelecidas pelo ETM. Uma das vantagens do PETC é garantir o intervalo mínimo entre eventos que nunca é inferior ao período de amostragem, evitando o efeito Zeno.

Existem vários trabalhos que consideram a transmissão por ETM centralizado, isto é, o estado do sistema é transmitido quando ele varia de um determinado valor (Yue et al., 2013; Yan et al., 2020; Coutinho and Palhares, 2021; Luo et al., 2021). A vantagem dessa estratégia é a maior facilidade de formulação de uma condição de estabilidade baseado no teorema de Lyapunov, que resulta em formulações por desigualdade matriciais lineares (LMI, do inglês *Linear Matrix Inequality*). O problema da implementação do ETM centralizado é concentrar todas as medições em um único ETM, o que irá requerer comunicação entre os sensores e o ETM. Outra possibilidade é o uso de ETM descentralizado, em que existe um ETM individual para cada sensor e atuador e a decisão de transmitir, ou não, é baseada somente em informação local (Mazo and Tabuada, 2011; Heemels et al., 2013).

Em Gonçalves et al. (2022) foi proposta um forma de determinar os parâmetros dos ETMs em um PETC descentralizado, através da solução de um problema multi-objetivo, cujas soluções possuem diferentes compromissos entre o desempenho do sistema de controle e o uso da rede. As funções objetivo do problema multi-objetivo são baseadas na simulação do NCS considerando um controlador proporcional-integral (PI) multivariável já existente, atrasos variantes aleatórios induzidos pela rede e perdas de pacotes. Para cada estudo de caso, são avaliados dois períodos de amostragens diferentes. A contribuição original desse trabalho é modificar o método apresentado em Gonçalves et al. (2022) para fazer a síntese conjunta do controlador PI multivariável e dos parâmetros dos ETMs. Considerando que o controlador PI multivariável será sintonizado para as condições da rede com ETM, isto é, atrasos aleatórios, perdas de pacotes e transmissão por evento, é de se esperar que o controlador tenha um melhor desempenho que um controlador que foi projetado considerando o sistema com amostragem periódica e transmissão de sinais sem os efeitos da rede, como foi considerado em Gonçalves

et al. (2022). Além disso, outra contribuição original desse trabalho é incluir como variável de otimização o período de amostragem. Nos resultados obtidos em Gonçalves et al. (2022), foi observado que a redução do período de amostragem pode melhorar o desempenho do sistema de controle sem aumentar o número de transmissões pela rede. A síntese conjunta é considerada em vários trabalhos (Peng and Yang, 2013; Liu et al., 2020; Coutinho and Palhares, 2021). Como estudo de caso é considerado um sistema de controle multivariável bem conhecido na literatura, com duas entradas e duas saídas, totalizando quatro elementos do sistema de controle.

## 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,  $h$ , e que os instantes de envio das mensagens de cada sensor para o controlador e do controlador para cada atuador são determinados pelos mecanismos de acionamento por evento (ETM). O bloco sistema inclui os atuadores e sensores. O sistema é modelado em tempo discreto no espaço de estados, considerando  $t_k = kh$ ,  $k \in \mathbb{N}$ , como:

$$\begin{aligned} x(t_{k+1}) &= Ax(t_k) + B_{ad}d(t_k) + B_u\bar{u}(t_k), \\ y(t_k) &= Cx(t_k) + D_{ad}d(t_k), \end{aligned} \quad (1)$$

sendo  $x(t_k) \in \mathbb{R}^n$  o vetor de estados do sistema,  $d(t_k) \in \mathbb{R}^v$  o vetor de distúrbios,  $y(t_k) \in \mathbb{R}^q$  o vetor de saídas controladas e  $\bar{u}(t_k) \in \mathbb{R}^p$  o vetor de variáveis manipuladas composto pelos valores mais atuais recebidos até o instante  $t_k$ , que depende dos atrasos da rede e perdas de pacotes. O sinal de controle  $\bar{u}(t)$  é mantido constante entre os períodos de amostragem através de um segurador de ordem zero (ZOH, do inglês *zero-order-hold*):

$$\bar{u}(t) = \bar{u}(t_k), \quad t \in [t_k, t_{k+1}). \quad (2)$$

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

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

sendo  $x_c(t_k) \in \mathbb{R}^{n_c}$  o vetor de estados do controlador,  $r(t_k) \in \mathbb{R}^q$  o vetor de sinais de referência,  $u(t_k) \in \mathbb{R}^p$  o vetor de ação de controle e  $\bar{y}(t_k) \in \mathbb{R}^q$  o vetor de variáveis medidas com os valores mais atuais recebidos pelo controlador multivariável até o instante  $t_k$ .

Seja  $\eta = q + p$  a soma das variáveis controladas e variáveis manipuladas e defina

$$v(t_k) = \begin{bmatrix} y(t_k) \\ u(t_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^\eta, \quad \bar{v}(t_k) = \begin{bmatrix} \bar{y}(t_k) \\ \bar{u}(t_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^\eta, \quad (4)$$

e  $\hat{t}_i$  como sendo o instante da última transmissão do  $i$ -ésimo sinal,  $v_i$ , que é transmitido junto com o valor de tempo (mecanismo de *timestamping*):  $\{v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i\}$ . No intervalo entre dois instante de amostragens, o controlador e os atuadores podem receber várias mensagens tais que  $[\hat{t}_i + \tau_i(\hat{t}_i)] \in [t_k, t_{k+1})$ , sendo  $\tau_i(\hat{t}_i)$  o atraso induzida pela rede, que varia de acordo com a conexão sensor/controlador ou controlador/atuador e para cada instante em que a transmissão ocorre. Seja  $\bar{t}_i(t_{k+1})$  o instante de transmissão

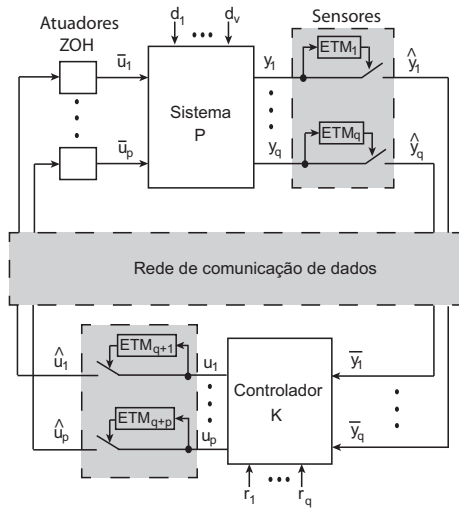


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema de controle via rede com mecanismos de transmissão por evento.

da última mensagem armazenada  $\bar{v}_i(t_{k+1})$ . O controlador e os atuadores devem possuir um mecanismo para descartar as mensagens recebidas com instante de transmissão  $\hat{t}_i$  menores que  $\bar{t}_i(t_{k+1})$ , isto é, instante de transmissão mais atrasado do que o da mensagem mais atual armazenada. No instante  $t_k$ , são fixados os valores iniciais como sendo  $\bar{v}_i(t_{k+1}) = \bar{v}_i(t_k)$  e  $\bar{t}_i(t_{k+1}) = \bar{t}_i(t_k)$ . Cada transmissão com *timestamp*  $\{v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i\}$  que é recebida entre dois instantes de amostragem,  $[t_k, t_{k+1})$ , é avaliada se o tempo de transmissão é mais recente que o da armazenada:

$$\begin{aligned} \text{SE } \hat{t}_i > \bar{t}_i(t_{k+1}) \\ \text{ENTÃO } \bar{t}_i(t_{k+1}) &\leftarrow \hat{t}_i, \\ \bar{v}_i(t_{k+1}) &\leftarrow v_i(\hat{t}_i), \\ \text{SENÃO } &\text{descarta } \{v_i(\hat{t}_i), \hat{t}_i\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Desse modo, se nenhuma mensagem nova de  $v_i$  for recebida, o valor de  $\bar{v}_i$  é mantido igual ao valor do último instante de amostragem ou se novas mensagens chegaram, o valor associado ao instante de tempo mais recente  $\hat{t}_i$  é armazenado e as mensagens desatualizadas são descartadas e consideradas perdas de pacote.

A transmissão de  $v_i(t_k)$  ocorre baseada na informação local. Seja  $\hat{v}_i(\hat{t}_i)$  o valor da última transmissão do sinal  $v_i$  (informação que deve estar armazenada no sensor, para  $i = 1, \dots, q$ , ou no controlador, para  $i = q + 1, \dots, \eta$ ). O valor de  $v_i(t_k)$  é enviado toda vez que uma função da diferença entre o valor amostrado,  $v_i(t_k)$ , e o último valor transmitido,  $\hat{v}_i(\hat{t}_i)$ , atinge um determinado limiar. O valor mínimo de tempo entre-eventos é maior ou igual ao período de amostragem,  $t_k - \hat{t}_i \geq h$ . Seja  $\delta_i$  os parâmetros de ajuste dos ETMs. Foram consideradas neste trabalho três formas de implementação dos ETMs:

**ETM-1.** Valor absoluto da diferença Miskowicz (2006):

$$\psi_i(t_k) = |v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i. \quad (6)$$

**ETM-2.** Integral do valor absoluto da diferença:

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + h|v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i. \quad (7)$$

**ETM-3.** Integral do valor absoluto da diferença combinado com o valor absoluto da diferença:

$$\psi_i(t_k) = \psi_i(t_{k-1}) + h|v_i(t_k) - \hat{v}_i| \geq \delta_i - \delta_{\eta+i}|v_i(t_k) - \hat{v}_i|. \quad (8)$$

$i = 1, \dots, \eta$ . O número de parâmetros de ajuste dos ETMs é igual a  $\eta$  para os ETM-1 e ETM-2 e igual a  $2\eta$  para o ETM-3. Quando cada limiar é atingido,  $\{v_i(t_k), t_k\}$  é transmitido e é feita a atualização  $\hat{v}_i \leftarrow v_i(t_k)$ . No caso dos ETMs 2 e 3, toda vez que o limiar é atingido e a informação é transmitida, a integral numérica é reinicializada como zero,  $\psi(t_k) \leftarrow 0$ . ETM baseado em integral (IETM) aparece em vários trabalhos (Mousavi et al., 2015; Zhang et al., 2017; Yu and Hao, 2017; Zhang et al., 2020).

Nas simulações realizadas, é considerado que o controlador, sensores e atuadores possuem a capacidade de implementar o ETM, isto é, calcular a função  $\psi$ , descartar as mensagens desatualizadas, armazenar o valor mais recente recebido  $\hat{v}_i$ , como descrito na regra (5), e implementar o protocolo de comunicação.

### 3. SINTONIA DO CONTROLADOR E ETMS E OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE AMOSTRAGEM

Considere o problema de otimização multi-objetivo (POM):

$$\min_{\chi} \mathbf{f}(\chi) \text{ sujeito a: } \chi \in \mathcal{F}_x, \quad (9)$$

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

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

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

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

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

Para o projeto do sistema de controle via rede, os parâmetros de otimização são os limiares das leis de amostragem,  $\delta_k$ ,  $k = 1, \dots, \eta$ , sendo  $\eta = p + q$ , para os ETM-1 e ETM-2, e  $k = 1, \dots, 2\eta$ , para o ETM-3, o período de amostragem,  $h$ , e os ganhos dos controladores PI,  $k_{P,ij}$  e  $k_{I,ij}$ ,  $i = 1, \dots, q$ ,  $j = 1, \dots, p$ :  $\chi = [\delta_1, \dots, \delta_{\eta}, h, k_{P,11}, k_{I,11}, \dots, k_{P,qp}, k_{I,qp}]^T$ . O total de variáveis de otimização é dado por:  $\varrho = p + q + 2pq + 1$  ou  $\varrho = 2(p + q) + 2pq + 1$ , no caso do ETM-3. São consideradas duas funções objetivos a serem minimizadas. As funções objetivos são calculadas a partir de simulação do sistema de controle via rede considerando atrasos aleatórios e perdas de pacotes independentes para cada conexão. A primeira é o critério de desempenho integral do erro absoluto (IAE, do inglês *Integral Absolute Error*) e a segunda o número total de transmissões via rede:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{2h} \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{j=1}^q [|e_j(t_k)| + |e_j(t_{k-1})|], \\ f_2 = N_t, \end{cases} \quad (11)$$

sendo  $e_j(t_k) = r_j(t_k) - y_j(t_k)$  o erro de rastreamento,  $n_k h$  o tempo final de simulação e  $N_t$  o somatório do número total

de transmissões de cada sensor e para cada atuador. Cada vez que um ETM atinge o limiar de transmissão, então  $N_t = N_t + 1$ . A definição da função objetivo é a mesma que em Gonçalves et al. (2022), o que muda nesse trabalho são as variáveis de otimização que, além dos parâmetros dos ETMs, incluem os parâmetros do controlador e o período de amostragem. A região factível  $\mathcal{F}_x$  é definida pelas restrições  $\underline{\chi}_i \leq \chi_i \leq \bar{\chi}_i$ ,  $i = 1, \dots, \varphi$ , sendo os valores mínimos e máximos definidos pelo projetista. Considerando que os atrasos induzidos pela rede e as perdas de pacote são aleatórias, diferente de Gonçalves et al. (2022), foi adotado nesse trabalho calcular as funções objetivo como sendo o valor médio de vinte simulações, em que cada simulação possui um perfil de atrasos e perdas de pacotes diferentes. Cabe ressaltar que para cada solução avaliada, as simulações são realizadas com os mesmos conjuntos de perfis de atraso e perda de pacotes.

#### 4. EXEMPLO ILUSTRATIVO

Considere o sistema de controle de uma coluna de destilação binária apresentado na Figura 2 (Wood and Berry, 1973). As variáveis controladas,  $y$ , são as composições dos produtos de topo e de base, as variáveis manipuladas,  $u$ , são as vazões de refluxo, no topo, e de vapor, no trocador de calor na base, e a perturbação,  $d$ , é a vazão de alimentação. O modelo do sistema,  $y = G_p(s)u + G_d(s)d$  é dado por (Wood and Berry, 1973):

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-1s}}{16.7s + 1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21.0s + 1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s + 1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s + 1} \end{bmatrix},$$

$$G_d(s) = \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8.1s}}{14.9s + 1} \\ \frac{4.9e^{-3.4s}}{13.2s + 1} \end{bmatrix}.$$

O modelo original no domínio da frequência é discretizado e convertido para uma representação no espaço de estados na forma da Eq. (3).

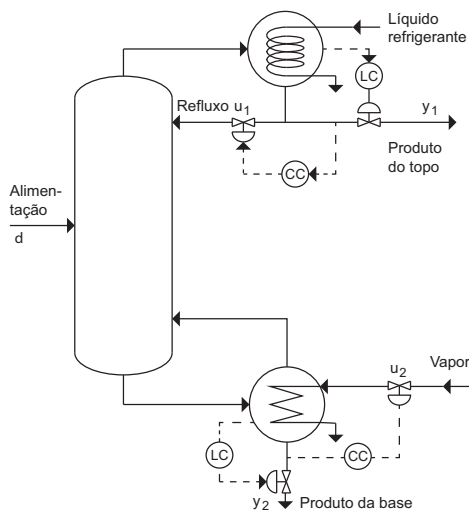


Figura 2. Diagrama da coluna de destilação binária.

Para este sistema, no cálculo das funções objetivo, adotou-se o tempo total de simulação  $t_f = 900\text{min}$  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  $\tau$ , 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,  $r_1(t) = \mathbf{1}(t-10)$  e  $r_2(t) = \mathbf{1}(t-600)$  e um distúrbio  $d(t) = 0,1[\mathbf{1}(t-300) - \mathbf{1}(t-310)]$ . Foram considerados atrasos com distribuição normal com média zero e variância igual a 5,3, respectivamente, e 5% de perdas com distribuição uniforme. Os parâmetros adotados para o algoritmo de otimização evolução diferencial multiobjetivo foram: tamanho da população  $N_p = 50$ , que é igual ao número de soluções eficientes obtidas, e número de gerações  $N_g = 2.000$ . O valor do período de amostragem é restrito à faixa:  $h \in [0,1\text{min}; 1\text{min}]$ .

A Figura 3 apresenta um subconjunto das soluções candidatas Pareto-ótimo para os três ETMs avaliados. As soluções não mostradas correspondem a número elevado de  $N_t$  sem melhoria significativa no  $IAE$  ou número menor de  $N_t$  mas com  $IAE$  muito elevado.

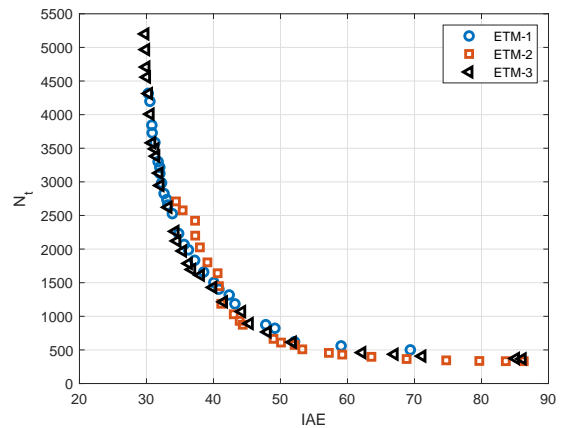


Figura 3. Parte das soluções candidatas pareto-ótimo para os três ETMs dentro da região de interesse.

Para análise dos resultados, as soluções são ordenadas em ordem crescente de  $f_1$  e as selecionadas são submetidas a duzentas simulações para um cálculo da média das funções objetivo com maior precisão. A X-ésima solução do Y-ésimo ETM e denotada por ETC-X #Y. Na Tabela 1 são listadas as melhores soluções que atendem determinado valor médio de  $IAE$  e de número de transmissões. São informados o número da solução, os valores médios nas duzentas simulações do  $IAE$  e  $N_t$ , e o período de amostragem,  $h$ . O valor percentual do número médio de transmissões em relação ao controlador periódico (CTP) apresentado entre parênteses. O ETM-2 não possui solução com  $IAE < 30$  sendo listada a solução com menor  $IAE$  obtida. Baseado nos resultados obtidos, os ETM-1 e ETM-3 são mais indicados quando se deseja melhor desempenho em detrimento do número de transmissões ao passo que os ETM-2 e ETM-3 podem apresentar menor número de transmissões mais ainda com desempenho aceitável (sistema estabiliza dentro do tempo de simulação). A solução ETM-2 #30, não listada na tabela, é a que apresenta desempenho aceitável,  $IAE = 88,4323$ , com menor número de transmissões,  $N_t = 345,815$ , para  $h = 0,23\text{min}$ .

Tabela 1. Comparação entre os ETMs para soluções selecionadas

	ETM-1				ETM-2				ETM-3			
	#	IAE	$N_t$	$h(\text{min})$	#	IAE	$N_t$	$h(\text{min})$	#	IAE	$N_t$	$h(\text{min})$
$IAE < 30$	1	29,9	6.992,3(19,4%)	0,10	1	32,8	13.983(19,4%)	0,14	5	30,0	5.193,8(14,4%)	0,10
$IAE < 40$	22	39,3	1.700,5(4,7%)	0,14	12	39,4	1.807,1(5,0%)	0,14	22	39,3	1.659,7(4,6%)	0,14
$N_t < 500$	32	182,5	498,04(1,4%)	0,97	22	59,1	470,56(1,3%)	0,14	29	63,3	468,33(1,3%)	0,10

Para comparar a capacidade dos NCSs com transmissão baseada em ETMs (NCS/ETM), projetados pelo método proposto, vamos analisar a solução ETM-3#5:

$$\delta = [0,0005 \ 0,0002 \ 0,0004 \ 0,0001 \ 0,88 \ 2 \ 0,4554 \ 1,7327],$$

$$K(z) = \left[ \begin{array}{c|c} A_c & B_c \\ \hline C_c & D_c \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & 0,0625 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,0625 \\ \hline 0,0247 & -0,0273 & 0,1561 & -0,1225 \\ 0,0071 & -0,0188 & 0,0261 & -0,1394 \end{array} \right].$$

Considerando esse mesmo controlador e período de amostragem, mas com transmissão baseada em tempo (CTP, controlador periódico), foram obtidos os seguintes resultados médios para as duzentas simulações:  $IAE = 29,5503$  e  $N_t = 36.004$ . A primeira observação importante é que cerca de 85,2% das transmissões do CTP são perdas,  $N_p = 30.658$ , sendo  $N_p$  o valor médio de perdas, seja por perdas de pacotes ou por descarte de mensagens desatualizadas (pelo efeito do atraso variante induzido pela rede). A segunda observação é que a solução ETM-3#5 requer cerca de 14,4%, em média, do total de transmissões do CTP para um IAE médio em torno de 1,4% maior. Das duzentas simulações, iremos apresentar as respostas transitórias dos piores casos, com  $IAE = 34,1610$  para ETM-3#5 e  $IAE = 34,6604$  para o CTP. A Figura 4 apresenta o perfil de atrasos induzidos pela rede em múltiplos inteiros do período de amostragem, tendo uma ocorrência de atraso igual a  $231h$ . As Figuras. 5 e 6 apresentam as respostas no tempo das saídas e entradas (após o ZOH) do sistema  $P$  para o ETM-3#5 e para o CTP (nas mesmas condições). Pode ser observado que as respostas transitórias são bastante semelhantes mesmo com o número muito menor de transmissão do NCS/ETM. Foi verificado que no caso do NCS/ETM, no final da simulação, os erros de rastreamento não convergem para zero e existe uma oscilação em torno dos valores de referência de amplitude menor que  $10^{-3}$ . A Figura 7 apresenta o intervalo entre transmissões por período de amostragem, para cada elemento do sistema de controle, para a mesma simulação das figuras anteriores, sendo o maior intervalo entre eventos igual a  $418h$  nas transmissões do controlador para o atuador 1.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto uma método para projetar conjuntamente o controlador, os mecanismos de transmissão por evento e o período de amostragem em controle via rede para obter um bom compromisso entre minimização do uso da rede e o desempenho do sistema de controle. É considerado controle periódico com mecanismos de transmissão por evento descentralizados. O método é baseado em um problema de otimização multi-objetivo em que as funções objetivo são a integral de erro absoluto e o número de transmissões. As funções objetivo são calculadas pelo valor médio de várias simulações considerando o efeito de atrasos variantes aleatórios e perdas de pacote. Por meio do estudo de caso foi verificado que o método proposto

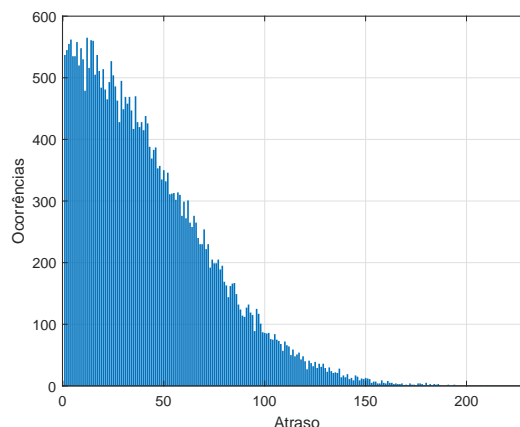


Figura 4. Perfil de atrasos em múltiplos inteiros do período de amostragem para pior caso de simulação da solução ETM-3#5.

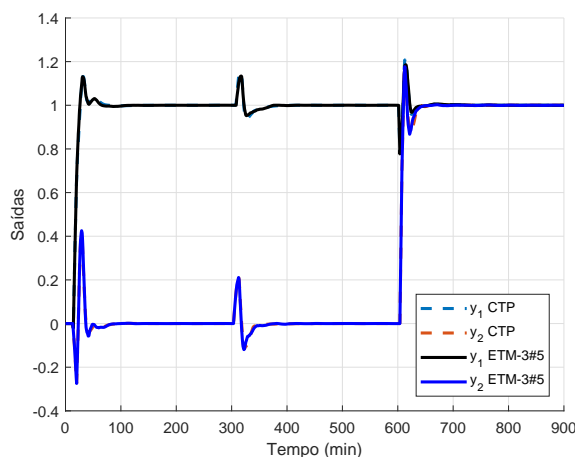


Figura 5. Respostas no tempo das saídas da planta para pior caso de simulação da solução ETM-3#5.

produz soluções que geram uma redução significativa do número de transmissões sem perda de desempenho.

## REFERÊNCIAS

- Baillieul, J. and Antsaklis, P.J. (2007). Control and communication challenges in networked real-time systems. *Proceedings of the IEEE*, 95(1), 9–28. doi:10.1109/JPROC.2006.887290.
- 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. doi:10.1007/s11633-017-1099-2.
- Bemporad, A., Heemels, M., Johansson, M., et al. (2010). *Networked control systems*, volume 406. Springer. doi:

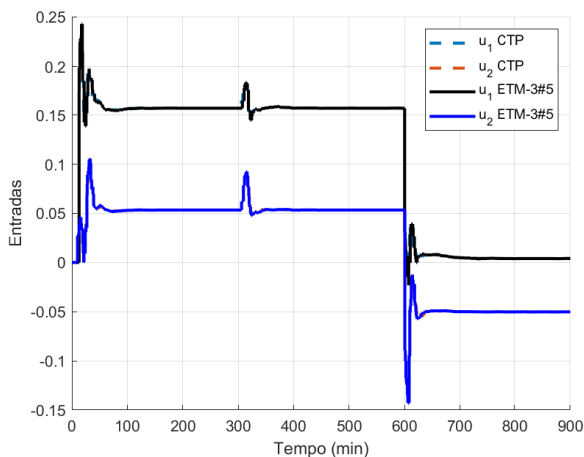


Figura 6. Respostas no tempo das entradas da planta (após ZOH) para pior caso de simulação da solução ETM-3#5.

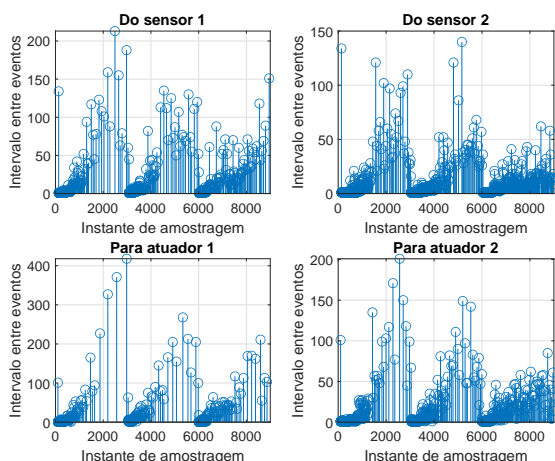


Figura 7. Intervalo entre transmissões por período de amostragem para cada elemento do sistema de controle para pior caso de simulação da solução ETM-3#5.

10.1007/978-0-85729-033-5\_9.

- Coutinho, P.H.S. and Palhares, R.M. (2021). Dynamic periodic event-triggered gain-scheduling control co-design for quasi-LPV systems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 41, 101044. doi:10.1016/j.nahs.2021.101044.
- Dolk, V.S., Borgers, D.P., and Heemels, W.P.M.H. (2017). Output-based and decentralized dynamic event-triggered control with guaranteed  $\mathcal{L}_p$ -gain performance and Zeno-freeness. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(1), 34–49. doi:10.1109/TAC.2016.2536707.
- Gonçalves, E.N., Belo, M.A.R., and Batista, A.P. (2022). Self-adaptive multi-objective differential evolution algorithm with first front elitism for optimizing network usage in networked control systems. *Applied Soft Computing*, 114, 108112. doi:10.1016/j.asoc.2021.108112.
- Heemels, W.P.M.H., Donkers, M.C.F., and Teel, A.R. (2013). Periodic event-triggered control for linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(4), 847–861. doi:10.1109/TAC.2012.2220443.

- Heemels, W.M.H., Teel, A.R., Van de Wouw, N., and Nešić, D. (2010). Networked control systems with communication constraints: Tradeoffs between transmission intervals, delays and performance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(8), 1781–1796. doi:10.1109/TAC.2010.2042352.
- Liu, D., Yang, G.H., and Er, M.J. (2020). Event-triggered control for T-S fuzzy systems under asynchronous network communications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(2), 390–399. doi:10.1109/TFUZZ.2019.2906857.
- Luo, B., Huang, T., and Liu, D. (2021). Periodic event-triggered suboptimal control with sampling period and performance analysis. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(3), 1253–1261. doi:10.1109/TCYB.2019.2909704.
- Mazo, M. and Tabuada, P. (2011). Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(10), 2456–2461. doi:10.1109/TAC.2011.2164036.
- Miskowicz, M. (2006). Send-on-delta concept: An event-based data reporting strategy. *Sensors*, 6(1), 49–63. doi:10.3390/s6010049.
- Mousavi, S.H., Ghodrati, M., and Marquez, H.J. (2015). Integral-based event-triggered control scheme for a general class of non-linear systems. *IET Control Theory & Applications*, 9(13), 1982–1988. doi:10.1049/iet-cta.2014.1322.
- Peng, C. and Yang, T.C. (2013). Event-triggered communication and  $\mathcal{H}_\infty$  control co-design for networked control systems. *Automatica*, 49(5), 1326–1332. doi:10.1016/j.automatica.2013.01.038.
- Tabuada, P. (2007). Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9), 1680–1685. doi:10.1109/TAC.2007.904277.
- Wood, R.K. and Berry, M.W. (1973). Terminal composition control of a binary distillation column. *Chemical Engineering Science*, 28(9), 1707–1717. doi:10.1016/0009-2509(73)80025-9.
- Yan, S., Shen, M., Nguang, S.K., and Zhang, G. (2020). Event-triggered  $\mathcal{H}_\infty$  control of networked control systems with distributed transmission delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(10), 4295–4301. doi:10.1109/TAC.2019.2953460.
- Yu, H. and Hao, F. (2017). Input-to-state stability of integral-based event-triggered control for linear plants. *Automatica*, 85, 248–255. doi:10.1016/j.automatica.2017.07.068.
- Yue, D., Tian, E., and Han, Q.L. (2013). A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(2), 475–481. doi:10.1109/TAC.2012.2206694.
- Zhang, H., Yu, H., and Hao, F. (2017). Decentralized integral-based event-triggered stabilization for linear plant with actuator saturation and output feedback. *Applied Sciences*, 7(1). doi:10.3390/app7010011.
- Zhang, L., Nguang, S.K., Ouyang, D., and Yan, S. (2020). Synchronization of delayed neural networks via integral-based event-triggered scheme. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(12), 5092–5102. doi:10.1109/TNNLS.2019.2963146.