Análise de Estratégias de Controle em Rede utilizando uma Bancada de Emulação de Redes de Comunicação

Juliana A. Salles, Romário H. S. Lage, Marcelo M. Tiago, Márcio F. Braga

Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP, 35931-008, João Monlevade, MG, Brasil.
(e-mails: juliana.salles@aluno.ufop.edu.br, romario.lage@aluno.ufop.edu.br, marcelomtiago@ufop.edu.br, mfbraga@ufop.edu.br.)

Abstract: This paper presents a comparative analysis between Zero-Input and Hold-Input control strategies for dynamic systems connected via a wireless communication network. A emulation environment consisting of three microcontrollers was designed to emulate the dynamic behavior of a remotely controlled industrial tank, as well as the effects of attenuation of the signals transmitted by the network. Two state feedback control techniques, with reference tracking, were evaluated for the stabilization of Markov Jump Linear Systems, which appropriately model the packet loss introduced by the communication network. The results show that the Zero-Input strategy performed better, especially when aligned with the designed mode-dependent controllers, with an average reduction of 85% in settling time.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre estratégias de controle *Zero-Input* e *Hold-Input* para sistemas dinâmicos, conectados por meio de uma rede de comunicação sem fio. Uma bancada de testes, composta por três microcontroladores, foi projetada para emular o comportamento dinâmico de um tanque industrial controlado remotamente, bem como os efeitos da atenuação dos sinais transmitidos pela rede. Foram avaliadas duas técnicas de controle por realimentação de estados, com seguimento de referência, para a estabilização de Sistemas Lineares Sujeitos a Saltos Markovianos, que modelam apropriadamente a perda de pacotes inserida pela rede de comunicação. Os resultados mostram que a estratégia *Zero-Input* apresentou melhor desempenho, principalmente quando alinhada aos controladores dependente de modo projetados, com redução média de 85% no tempo de assentamento.

Keywords: Emulation environment; Wireless networks; Networked control systems; Markov Jump Linear systems.

Palavras-chaves: Bancada de emulação; Redes sem fio; Sistemas de controle em rede; Sistemas Lineares Sujeitos a Saltos Markovianos.

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade por sistemas de segurança e controle, tanto em meio industrial como residencial, alavancou a demanda por soluções que utilizam redes de sensores sem fio, suprimindo dificuldades como custo e locais de instalação de difícil acesso (Reis e Fernandez, 2007). No entanto, apesar das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) serem opções eficientes para as dificuldades que envolvem valor e ambiente de instalação, existem obstáculos para a implementação de redes de comunicação que envolvem parâmetros como potência de transmissão, escalabilidade e a qualidade do sinal de modo geral.

Além disso, estratégias básicas para controlar sistemas em rede mostram-se ineficazes, pois não consideram restrições comuns às redes de comunicação, como perdas de pacotes, atraso de transporte e limitação de largura de banda (Braga et al., 2014). Assim, diversos trabalhos na literatura tratam do problema de controle em rede (Delforno, 2020; Braga et al., 2014; Hespanha et al., 2007; Seiler e Sengupta, 2001), visando mitigar a influência desses inconvenientes presentes nas redes sem fio. Porém, a aplicação prática das técnicas desenvolvidas torna-se onerosa e, em alguns casos, impraticável, quando há a necessidade de construção de uma RSSF, apresentando um dado problema específico comum em redes dessa natureza. Desse modo, faz-se necessário o estudo de aplicações que permitam emular redes reais, acelerando o processo de testes, além de adequar e validar estratégias de controle propostas pela literatura, mas que ainda não foram testadas, considerando perturbações e obstáculos comuns existentes em redes de comunicação sem fio.

Portanto, este trabalho objetiva, em um primeiro momento, a elaboração de um ambiente para emulação de redes de comunicação considerando perturbações exter-

nas, assim como ocorre em sistemas reais. Posteriormente, dispõe-se a utilizar a bancada construída para testar estratégias de controle em rede, baseadas em desigualdades matriciais lineares (LMI, do inglês *Linear Matrix Inequalities*), para sistemas dinâmicos, simulando dificuldades enfrentadas em redes reais, como a atenuação de sinal.

Dos testes realizados, ficou demonstrado que as técnicas de controle proporcionam maior estabilidade e rapidez no controle em rede, quando comparadas ao controlador projetado sem considerar perda de pacotes. Além disso, verificou-se que a estratégia *Zero-Input* apresentou melhor desempenho, principalmente quando alinhada ao controlador dependente de modo. Desta forma, dado que sistema elaborado admite a modelagem matemática e análise dos efeitos da perda de pacotes, evidencia-se a relevância do trabalho para o estudo e desenvolvimento futuro de novas condições de projeto de controladores para sistemas controlados por redes de comunicação. Com isso, espera-se proporcionar um ambiente de estudos para a validação de técnicas de controle via rede e criação de novas condições de projetos de controladores com desempenho e resultados mais fidedignos à realidade.

2. PRELIMINARES

2.1 Sistemas de Controle em Rede

Em Hespanha et al. (2007), definem-se os Sistemas de Controle via Rede (NCS, do inglês *Networked Control System*) como sistemas de controle que compartilham redes de comunicação, possuindo controladores, atuadores e sensores localizados em áreas diferentes. Na estrutura básica de um NCS, indicada na Figura 1, ocorre o tráfego do sinal a ser controlado a partir do sensor, passando pela rede de comunicação até atingir a entrada do controlador. Após isso, é retornado o sinal de controle, que passa novamente pela rede de comunicação, o qual é recebido pelo atuador. O fluxo de dados entre o controlador e a planta – fisicamente dispersos – possibilitado pela rede de comunicação torna o projeto mais flexível e vantajoso para aplicações industriais, rodoviárias, automobilísticas, hospitalares, entre outros (Seiler e Sengupta, 2001).

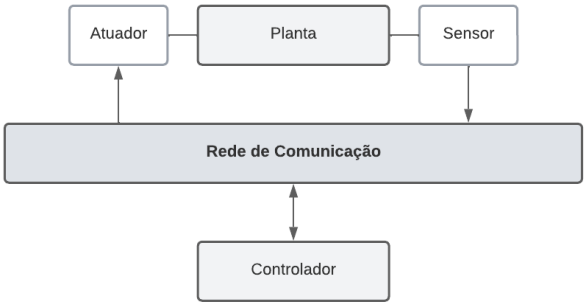


Figura 1. Arquitetura geral de um NCS.

Em geral, as limitações sofridas por um NCS envolvem obstáculos relacionados à largura de banda, amostragem, atraso de acesso à rede, atraso de transmissão, perdas de pacotes, sobrecarga de *buffer* e restrições quanto à própria arquitetura do NCS. Tais limitações podem ocasionar dificuldades em realizar o controle do sistema e alcançar os parâmetros e desempenho desejados. Portanto, a bancada de emulação de redes foi concebida e empregada para conduzir testes considerando a atenuação do sinal, a fim de compreender a influência da perda de pacotes em projetos de controle em rede.

2.2 Sistemas Lineares com Saltos Markovianos

Considerando as restrições enfrentadas pelos sistemas controlados via rede, torna-se necessário que a modelagem desses sistemas contemple condições que podem influenciar o controle do sistema. Assim, a modelagem por Sistemas Lineares com Saltos Markovianos (MJLS, do inglês *Markov Jump Linear Systems*) apresenta-se como uma abordagem viável, considerando as matrizes de probabilidade de transição de estados (Costa et al., 2005).

Desse modo, dado que a sequência $\{\theta(k), k = 0,1,\ldots\}$ caracteriza a cadeia de Markov homogênea em tempo discreto e $\mathbb{K} \triangleq \{1,\ldots,N\}$ caracteriza os modos de operação, pode-se definir a matriz de probabilidade de transição como

$$\begin{gathered} p_{ij} = \mathrm{P}(\theta(k+1) = j \mid \theta(k) = i), \\ \forall i, \quad j \in \mathbb{K}, \quad \forall k \geq 0. \end{gathered} \tag{1}$$

Portanto, define-se um MJLS em tempo discreto como

$$\begin{gathered} x(k+1) = A_{\theta(k)}x(k) + B_{\theta(k)}u(k), \\ k \geq 0, \quad x(0) = x_0, \quad \theta(0) = \theta_0, \end{gathered} \tag{2}$$

em que $x(k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ é o vetor de estado do sistema, $u(k) \in \mathbb{R}^{n_u}$ é o vetor da entrada de controle e $\theta_0 \in \mathbb{K}$. As matrizes $A_{\theta(k)}$ e $B_{\theta(k)}$ são, respectivamente, as matrizes da dinâmica e de entradas que, simplificadamente, podem ser denotadas por $(A_{\theta(k)}, B_{\theta(k)}) = (A_i, B_i)$, $\forall \theta(k) \in \mathbb{K}$.

Para a análise de estabilidade de MJLS, aplica-se o conceito de Estabilidade por Média Quadrática (MSS, do inglês *Mean Square Stability*). Conforme (Costa et al., 2005), a estabilidade do MJLS é assegurada, se

$$\lim_{k\to\infty} \mathcal{E}[\|x(k)\|] \to 0\,, \quad \forall x_0 \in \mathbb{R}^{n_x}, \quad \theta_0 \in \mathbb{K}, \tag{3}$$

em que $\mathcal{E}$ indica a esperança matemática.

O lema a seguir apresenta uma condição finita para testar a estabilidade de um MJLS.

Lema *1.* (Costa et al. (2005)). O sistema (2), com $u \equiv 0$, é estável por média quadrática se, e somente se, existirem matrizes definidas positivas $P_i = P_i^T, i = 1,\ldots,N$, de forma que a seguinte LMI seja válida, para $i \in \mathbb{K}$,

$$A_i^T \left(\sum_{j=1}^{N} p_{ij} P_j \right) A_i - P_i < 0. \tag{4}$$

2.3 Técnicas de Controle Aplicadas a MJLS

O problema de controle por realimentação de estados de MJLS envolve determinar os ganhos K_i, com $i \in \mathbb{K}$, com base na seguinte lei de controle

$$u(k) = K_i x(k), \tag{5}$$

visando estabilizar o sistema (2) operando em malha fechada. Assim, deve ser estável o seguinte sistema

$$x(k+1) = (A_i + B_i K_i)x(k). \tag{6}$$

Existem diversos teoremas na literatura que abordam técnicas que tem como base o controle por realimentação de estados. Como, neste trabalho, o foco é apenas o projeto de um controlador estabilizante, consideram-se versões simplificadas das condições apresentadas em Gonçalves et al. (2012, Teorema 1) e Braga et al. (2013, Teorema 2), as quais são apresentadas a seguir e cujas provas podem ser encontradas nos respectivos artigos supracitados.

Teorema *1.* (Gonçalves et al. (2012)). Existe uma lei de controle (5) que estabiliza o sistema (2) se, e somente se, existirem matrizes simétricas X_i e Z_{ij} e matrizes G_i, Y_i e H_i com dimensões apropriadas, tais que as LMIs [1]

$$\begin{bmatrix} Z_{ij} & \star \\ H_i & X_j \end{bmatrix} > 0, \quad \forall (i,j) \in \mathbb{K} \times \mathbb{K}. \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} G_i + G_i^T - X_i & \star \\ A_i G_i + B_i Y_i & H_i + H_i^T - Z_{pi} \end{bmatrix} > 0, \ \forall (i,j) \in \mathbb{K} \times \mathbb{K}, \tag{8}$$

com $Z_{pi} = \sum_{j=1}^{N} p_{ij} Z_{ij}$, sejam satisfeitas e os ganhos do controlador são dados por $K_i = Y_i G_i^{-1}$.

Teorema *2.* (Braga et al. (2013)). Se existirem matrizes simétricas definidas positivas $P_i \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$, matrizes $H_i \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$, $Z_i \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$, e um dado parâmetro escalar $\xi \in (-1,1)$, de forma que as seguintes LMIs sejam válidas para todo $i \in \mathbb{K}$,

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} -P_i + \xi \left(A_i H_i + B_i Z_i \right. \\ \left. + H_i^T A_i^T + Z_i^T B_i^T \right) \end{pmatrix} & \star \\ A_i H_i + B_i Z_i - \xi H_i & -P_{pi} + H_i + H_i^T \end{bmatrix} < 0, \tag{9}$$

com $P_{pi} = \sum_{j=1}^{N} p_{ji} P_j$. Então, tem-se que o sistema (2) é estabilizável por média quadrática pela matriz de ganhos $K_i = Z_i H_i^{-1}$ para a lei de controle (5) dependente de modo.

Observação 1. Note que os Teoremas 1 e 2 provêm leis de controle dependente do modo de operação. Caso se opte pelo uso de um controlador independente de modo, basta fazer $Y_i = Y$ e $G_i = G$, no Teorema 1, e $Z_i = Z$ e $H_i = H$, no Teorema 2.

2.4 Construção e Caracterização da Bancada de Emulação

A bancada de emulação proposta neste trabalho é composta pelos elementos básicos de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), além de um controlador e um atenuador digital, como mostrado na Figura 2, cuja estrutura básica segue o disposto em Delforno (2020).

Na estrutura mostrada na Figura 2, módulos microcontrolados (Espressif, modelo ESP32-WROOM-32) foram escolhidos para serem utilizados na etapa de construção da banca, por possuírem periféricos para comunicação *Wi-Fi* e *Bluetooth* integrados, simplificando o processo de construção. O módulo ESP32, definido como nó emissor, atua como controlador e o nó receptor, como a planta a ser controlada. Além disso, um terceiro módulo ESP32 com antena interna foi inserido no sistema, atuando como *access point* e gerando a rede *Wi-Fi* que permite a comunicação entre planta e controlador.

Para o envio de informações entre o controlador e a planta, foi aplicado o protocolo de comunicação UDP, executado

[1] O símbolo $\star$ caracteriza, genericamente, um bloco simétrico na LMI.

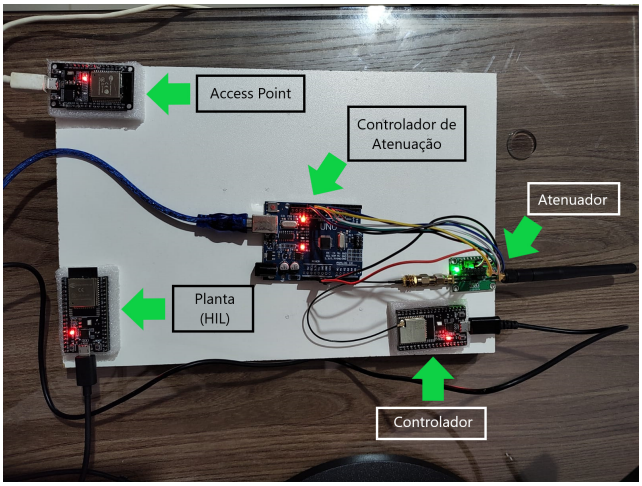


Figura 2. Banca de emulação de RSSF construída.

no módulo ESP32 via biblioteca `WifiUdp.h`. O protocolo UDP não possui controle de fluxo e congestionamento, visando a entrega instantânea dos dados enviados. Logo, por priorizar a velocidade do processo, o protocolo não garante a entrega dos pacotes, não utilizando mecanismos de retransmissão.

De modo a tornar o sistema construído mais próximo de um NCS real, a bancada foi configurada para elevar a perda de pacotes. Para isso, o atenuador foi ajustado para aplicar atenuação máxima (31,5 dB) e o módulo ESP32 que atua como *access point* foi posicionado ao lado do módulo ESP32 que atua como planta. A aproximação entre os módulos ESP32 foi realizada tendo como base o conceito de região de campo próximo aplicado a antenas (Balanis, 2005).

Por fim, a caracterização da bancada de emulação de redes foi realizada utilizando o modelo de propagação de onda em espaço livre (Rappaport, 1996), seguindo a mesma metodologia empregada em Delforno (2020). Os resultados obtidos mostram-se coerentes, por apresentarem um comportamento similar aos reportados em Delforno (2020). Sem atenuação, a potência do sinal permanece entre −29 dBm e −25 dBm. Por outro lado, para uma atenuação de 31,5 dBm, a potência do sinal é reduzida para uma faixa compreendida entre −61 dBm e −57 dBm, atingindo a atenuação máxima esperada.

3. SIMULAÇÃO DE UM TANQUE INDUSTRIAL COM SISTEMA HIL

A planta utilizada no sistema de controle em rede, construída neste trabalho, representa o sistema de controle de nível de um tanque industrial localizado na malha 31 presente na planta SMAR-PD3-F, cujas descrição detalhada e modelagem podem ser encontradas, respectivamente, em SMAR (2012) e Lage (2019).

A planta foi implementada com a metodologia HIL (do inglês, *Hardware in the Loop*), assim como proposto em Melo (2024). O sistema HIL tem como objetivo permitir a simulação em *hardware* de um sistema físico. Tal aplicação proporciona a redução de custos e permite a realização de inúmeros testes em tempo real, além de auxiliar na preservação da integridade dos dispositivos que compõem o sistema físico (Bastos et al., 2020).

3.1 Testes em Malha Fechada desconsiderando a perda de pacotes

Visando validar o sistema a ser controlado, foram realizados testes em malha fechada considerando o modelo discreto determinado em Melo (2024), para o ponto de operação de 50% do nível do tanque,

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0{,}003015z}{z^2 - 1{,}605z + 0{,}6081} \tag{10}$$

em que $U(z)$ representa a abertura da válvula pneumática que controla a vazão de água que entra no tanque, enquanto $Y(z)$, o nível do tanque descrito percentualmente. O período de amostragem utilizado foi $T = 1$ s. Assim, para a implementação da planta no microcontrolador, foram obtidas as equações a diferenças a partir de (10). Inicialmente, desconsiderando perdas de pacote, foi projetado um controlador digital PI, que possui o comportamento de um compensador por atraso de fase. A metodologia de projeto utilizada foi baseada na abordagem apresentada em Phillips e Nagle (1995), empregando a estratégia de resposta em frequência e a transformação bilinear, ou Método de *Tustin*. O projeto do controlador foi realizado utilizando o *software* MATLAB e visa assegurar uma margem de fase de $\phi = 55°$, definida arbitrariamente.

Desse modo, a função de transferência discreta do controlador aplicado ao tanque industrial, implementado com o sistema HIL para controle em rede, corresponde a

$$G_c(z) = \frac{0{,}4981z - 0{,}4825}{z - 1}. \tag{11}$$

Aplicando o controlador ao sistema implementado na bancada, considerando os cenários sem atenuação e com atenuação máxima, fica evidente, a partir da Figura 3, a distorção do sinal quando aplicada a atenuação máxima (curva em laranja), além do efeito de retardo na resposta do sistema. Portanto, desconsiderar a perda de pacotes gerada pela atenuação dos sinais do NCS impacta diretamente no comportamento dinâmico do sistema controlado. Sendo assim, modela-se a seguir o processo de perda de informação gerado pela atenuação do sistema de comunicação.

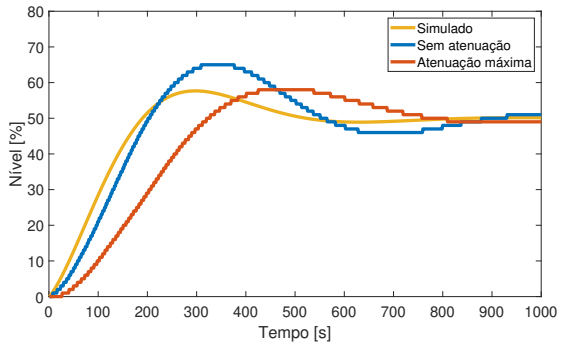


Figura 3. Comparação entre a resposta do sistema simulado, sistema sem atenuação e sistema com atenuação máxima para o ponto de operação em 50%.

3.2 Obtenção da Matriz de Probabilidade de Transição

Dado que, para o sistema em questão, consideram-se apenas dois estados: falha e sucesso na transmissão, modela-se o processo de Markov, utilizando o modelo de Gilbert-Elliot, cuja matriz de probabilidades de transição é dada por

$$P = \begin{bmatrix} 1 - p_{12} & p_{12} \\ p_{21} & 1 - p_{21} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

em que p_{12} e p_{21} são, respectivamente, as probabilidades de transição do estado de sucesso para o estado de falha e do estado de falha para o estado de sucesso na transmissão.

A seguir, foram realizados 10 testes para a aquisição de dados, totalizando 1000 amostras de falha ou sucesso na transmissão entre o controlador e a planta. Os parâmetros 1 e 0 foram adotados para indicar, respectivamente, sucesso e falha na transmissão. A determinação das probabilidades de transição são dadas por

$$p_{12} = \frac{t_{10}}{t_{11} + t_{10}}, \quad p_{21} = \frac{t_{01}}{t_{01} + t_{00}}, \tag{13}$$

em que t_{11} é a probabilidade de transição do estado de sucesso para outro sucesso consecutivo, t_{10} é a probabilidade de transição do estado de sucesso para o estado de falha, t_{01} é a probabilidade de transição do estado de falha para o estado de sucesso e, por fim, t_{00} é a probabilidade de transição do estado de falha para outra falha consecutiva na transmissão (Serafini et al., 2021). A partir dos testes, foi obtida a seguinte matriz de probabilidade de transição para o sistema com atenuação

$$P_{CA} = \begin{bmatrix} 0{,}8636 & 0{,}1664 \\ 0{,}1803 & 0{,}8197 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

a qual será empregada para testar as técnicas de controle no cenário com perdas de pacote, análogo a um NCS real.

4. CONTROLE EM REDE DE UM TANQUE INDUSTRIAL

Para a realização dos testes, têm-se que as matrizes que caracterizam o MJLS no ponto de operação de 50%, como visto em (10), considerando o sistema em rede e o problema de seguimento de referência, são dadas por

$$\begin{gathered} A_i = \begin{bmatrix} 1{,}6050 & -0{,}6081 & 0{,}0000 \\ 1{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ -0{,}0482 & 0{,}0000 & 1{,}0000 \end{bmatrix}, \; C_i = \begin{bmatrix} 0{,}0482 \\ 0{,}0000 \\ 0{,}0000 \end{bmatrix}^T, \\ B_1 = \begin{bmatrix} 0{,}0625 \\ 0{,}0000 \\ 0{,}0000 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0{,}0000 \\ 0{,}0000 \\ 0{,}0000 \end{bmatrix}, \quad D_i = 0, \end{gathered} \tag{15}$$

para $i = 1{,}2$, em que o modo de operação 1 e 2 modelam, respectivamente, o sistema quando ocorre a transmissão correta do pacote e quando há perda de pacote. Note que, dado que os modos considerados são falha e sucesso na transmissão de pacotes, para caracterizar a falha, as matrizes B_2 e D_2 foram definidas como zero.

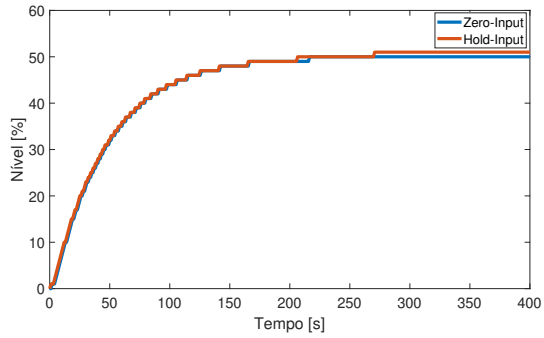
Destaca-se que as condições dos Teoremas 1 e 2 foram implementadas em MATLAB usando Yalmip (Löfberg, 2004) e SeDuMi (Sturm, 1999).

Teste 1. Foram determinadas as leis de controle empregando a condição do Teorema 1 e a matriz de probabilidade de transmissão P_{CA} (14). As matrizes de ganhos para o controle dependente de modo foram

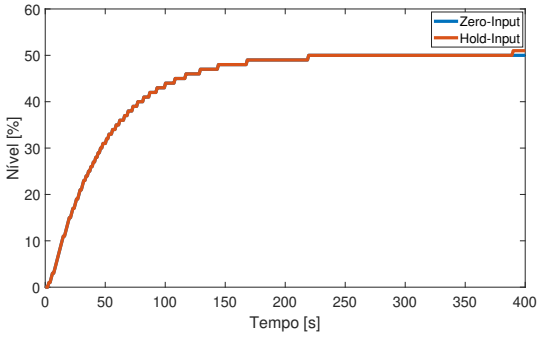
$$K_{DM_1} = [-17{,}7277 \;\; 9{,}7296 \;\; 3{,}4225], \tag{16}$$

$$K_{DM_2} = [0{,}0000 \;\; 0{,}0000 \;\; 0{,}0000]. \tag{17}$$

Como era de se esperar, dado que a matriz B_2 é nula, o ganho relativo ao modo 2 também é nulo. Portanto, a

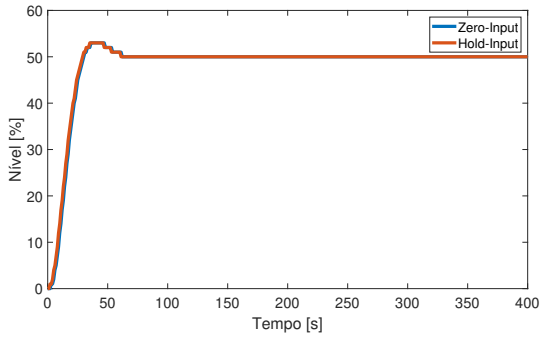


(a) Dependente de modo.

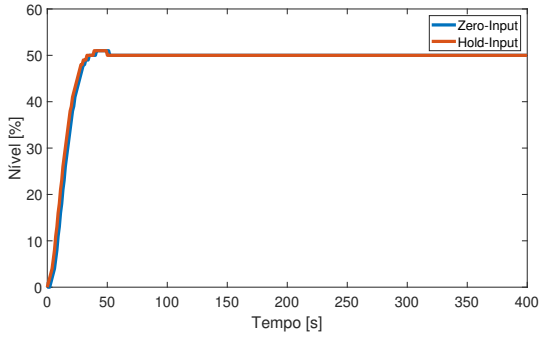


(b) Independente de modo.

Figura 4. Comparação entre a resposta do sistema à técnica de controle do Teorema 1 junto às estratégias *Zero-Input* e *Hold-Input*.



(a) Dependente de modo.



(b) Independente de modo.

Figura 5. Comparação entre resposta do sistema à técnica de controle do Teorema 2 junto às técnicas *Zero-Input* e *Hold-Input*.

partir deste ponto, o ganho para o modo 2 não será apresentado. Além disso, a matriz de ganhos para o controle independente de modo foi

$$K_{IM} = [-15{,}7018 \;\; 9{,}8595 \;\; 2{,}4405]\,. \tag{18}$$

Os resultados obtidos com a aplicação dos controladores dependente e independente de modo estão indicados na Figura 4.

Teste 2. Empregando o Teorema 2, determinaram-se os ganhos para o controle dependente e independente de modo para valores do parâmetro ξ entre $-0{,}9$ e $0{,}9$. Dado que altos ganhos do controlador podem ocasionar a saturação do sistema e, consequentemente, tornar o sistema mais lento e instável, a estratégia utilizada para a escolha do ξ foi buscar o parâmetro com menores ganhos. Dentre os valores testados, os menores ganhos em valor absoluto foram obtidos quando se emprega $\xi = -0{,}9$ para ambas as abordagens. Portanto, obtiveram-se, respectivamente, as seguintes matrizes de ganhos para o controle dependente e independente de modo

$$K_{\xi_{DM}} = [-3{,}6220 \;\; 2{,}4605 \;\; 1{,}8010]\,, \tag{19}$$

$$K_{\xi_{IM}} = [-3{,}6855 \;\; 2{,}2279 \;\; 2{,}0911]\,. \tag{20}$$

Os resultados obtidos para os controladores dependente e independente de modo aplicados junto às estratégias *Zero-Input* e *Hold-Input* estão indicados na Figura 5.

Comparação. Os resultados obtidos para os dois testes são sumarizados na Tabela 1. Analisando a Tabela 1, observa-se que os controladores dependentes de modo, em ambas as técnicas testadas, apresentam melhor desempenho em relação aos controladores independentes de modo. De modo geral, a estratégia *Zero-Input* proporciona um melhor desempenho. Destaca-se que os controladores dependentes de modo apresentaram menor tempo de subida (T_r) e, no geral, menor tempo de assentamento (T_s), permitindo uma resposta mais rápida do sistema.

Nota-se ainda que a condição do Teorema 2 proporcionou uma redução significativa no tempo de subida e tempo de assentamento, apesar do aumento no sobressinal (M_p). Dado que o sistema estabiliza mais rápido, tal técnica demonstra-se mais vantajosa, além de utilizar ganhos menores, que contribuem para evitar a saturação e melhorar a resposta do sistema. Ao comparar o sistema sem a modelagem via MJLS (vide Figura 3), nota-se que, em média, houve uma redução de 77% no tempo de assentamento e 34% no tempo de subida com a técnica do Teorema 1 (Gonçalves et al., 2012). Além disso, tem-se que, com a técnica do Teorema 2 (Braga et al., 2013), a redução no tempo de assentamento e tempo de subida foi, em média, de 94% e 88%, respectivamente.

Por fim, fica evidente que o controle projetado, considerando a modelagem matemática de perdas de pacote, proporciona maior estabilidade e rapidez no controle em rede. Assim, com base nos resultados alcançados, destaca-se a viabilidade de empregar uma rede com qualidade mais baixa e com custos reduzidos, mantendo, contudo, a eficácia do sistema de controle, desde que as informações da rede sejam consideradas no projeto.

Tabela 1. Características do sistema com controladores dependente (DM) e independente de modo (IM) projetados com os Teoremas 1 e 2.

Controlador	Estratégia	T_r	M_p	T_s
Teorema 1				
DM	*Zero-Input*	106,27s	0,00%	215,54s
	Hold-Input	107,07s	0,00%	206,49s
IM	*Zero-Input*	107,27s	0,00%	218,55s
	Hold-Input	108,07s	0,00%	219,53s
Teorema 2				
DM	*Zero-Input*	11,04s	6,00%	60,15s
	Hold-Input	18,04s	6,00%	61,15s
IM	*Zero-Input*	20,55s	2,00%	49,12s
	Hold-Input	20,55s	2,00%	51,13s

5. CONCLUSÃO

A bancada de emulação de redes de comunicação, desenvolvida neste trabalho, permite a simulação de situações reais, como a redução da intensidade do sinal e, consequentemente, aumento das perdas de pacote. Para validar a bancada desenvolvida, dois conjuntos de testes foram realizados. Analisando os resultados obtidos com as duas técnicas de controle testadas, verifica-se que, para o sistema empregado neste trabalho, a técnica de estabilização de MJLS discretos do Teorema 2 apresentou melhor desempenho em relação à técnica de controle do Teorema 1, no que se refere à rapidez, tendo, em média, apresentado uma melhoria de 80% no tempo de assentamento, ao preço do aumento da máxima ultrapassagem, cujos valores estão compreendidos entre 2% e 6%, e do custo computacional, dado que é preciso testar o conjunto de LMIs do Teorema 2 para cada valor de ξ escolhido. Destaca-se, ainda, que a técnica do Teorema 1 permitiu uma melhor visualização da atuação das estratégias *Zero-Input* e *Hold-Input* no sistema. No caso testado, a estratégia *Zero-Input* apresentou melhor desempenho, principalmente quando alinhada ao controlador dependente de modo, além de ser mais vantajosa quanto à redução do gasto computacional, por não necessitar de um *buffer*.

Por fim, evidencia-se a eficiência das duas técnicas de controle validadas, quando comparadas a um controle clássico, projetado sem considerar as limitações do sistema, pois houve uma redução de 77% e 94% no tempo de assentamento, respectivamente, com o uso dos Teoremas 1 e 2. Além disso, destaca-se a importância da bancada de emulação de redes de comunicação para o estudo e criação de novas técnicas de controle para NCS que se adequem a diferentes limitações, visando a busca por controladores mais eficazes aplicados a sistemas dinâmicos controlados via rede.

REFERÊNCIAS

Balanis, C.A. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*. John Wiley & Sons.

Bastos, R.F., Silva, F.B., Aguiar, C.R., Fuzato, G., e Machado, R.Q. (2020). Low-cost hardware-in-the-loop for real-time simulation of electric machines and electric drive. *IET Electric Power Applic.*, 14(9), 1679–1685.

Braga, M., Morais, C., Tognetti, E., Oliveira, R., e Peres, P. (2014). Discretisation and control of polytopic systems with uncertain sampling rates and network-induced delays. *Int. J. Control*, 87.

Braga, M.F., Morais, C.F., Oliveira, R.C.L.F., e Peres, P.L.D. (2013). Robust stability and stabilization of discrete-time Markov jump linear systems with partly unknown transition probability matrix. In *Proc. 2013 Amer. Control Conf.*, 6784–6789.

Costa, O.L.V., Fragoso, M.D., e Marques, R.P. (2005). *Discrete-Time Markovian Jump Linear Systems*. Springer-Verlag, New York, NY, USA.

Delforno, L. (2020). *Bancada de emulação de canal de rádio para RSSF em internet das coisas*. Dissertação de mestrado, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, PUC, Campinas, SP.

Gonçalves, A.P., Fioravanti, A.R., e Geromel, J.C. (2012). $\mathcal{H}_\infty$ robust and networked control of discrete-time MJLS through lmis. *J. Franklin Inst.*, 349(6), 2171–2181.

Hespanha, J.P., Naghshtabrizi, P., e Xu, Y. (2007). A survey of recent results in networked control systems. *Proc. IEEE*, 95(1), 138–162.

Lage, R.L. (2019). Projeto de um sistema de controle de nível para tanques industriais. Monografia, UFOP, João Monlevade, MG, Brasil.

Löfberg, J. (2004). YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In *Proc. 2004 IEEE Int. Symp. on Comput. Aided Control Syst. Des.*, 284–289. Taipei, Taiwan. http://yalmip.github.io.

Melo, H.H.S. (2024). Desenvolvimento de uma plataforma hardware in the loop para simulação de sistemas de controle em tempo real. Monografia, UFOP, João Monlevade, MG, Brasil.

Phillips, C.L. e Nagle, H.T. (1995). *Digital Control System Analysis and Design*. Prentice-Hall, Inc., USA.

Rappaport, T. (1996). *Wireless communications: Principles and practice*. Prentice Hall.

Reis, H.P. e Fernandez, F.J.R. (2007). Análise das perdas de pacotes alterando as variáveis de distância, obstáculos e interferência eletromagnética utilizando IEEE 802.15.4. *XI Enc. Lat. Amer. de Iniciação Científica e VII Enc. Lat. Amer. de Pós-Graduação – Univap*, 990–993.

Seiler, P. e Sengupta, R. (2001). Analysis of communication losses in vehicle control problems. In *Proc. 2001 Amer. Control Conf.*, volume 2, 1491–1496.

Serafini, A.R., Delforno, L., Palma, J.M., Behrens, F.H., e Morais, C.F. (2021). Robust static output-feedback control for MJLS with non-homogeneous Markov chains: A comparative study considering a wireless sensor network with time-varying PER. *Sensors*, 21(19), 6420.

SMAR (2012). Manual de instruções, operação e manutenção de plantas didáticas PD3-F.

Sturm, J.F. (1999). Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. *Optim. Method Softw.*, 11(1–4), 625–653. http://sedumi.ie.lehigh.edu/.