

\mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ state-feedback control through Multi-Hop Networks: Trade-Off Analysis Between the Network Load and Performance Degradation

J. M. Palma, L. de P. Carvalho, T. E. Rosa, C. F. Morais and R. C. L. F. Oliveira.

Abstract—This paper is concerned with the \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ control problems in networked control framework, dealing specifically with cases where the communication between the components is made via a multi-hop network susceptible to packet loss, which is modeled by a Markov chain with Bernoulli distribution. The aim is to investigate the trade-off between the network resource saving and the closed-loop performance degradation in the context of state-feedback control. The performance of the control design is measured by means of the \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ norms. Two main topics are evaluated: i) The influence of the initial probability distribution on the design of the controller; and ii) The relationship between the expected value of the output signal energy and the probability of successful transmissions (associated with the maximum allowable transmission per data packet) for a given transport scheme and a given performance criterion. The results are applied in a case study based on a linearized numerical model of the Furuta's inverted pendulum.

Keywords—Networked control systems, \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ state-feedback control, Multi-hop network, Semi-reliable communication network, Markov jump linear systems.

I. INTRODUÇÃO

EM FUNÇÃO DO GRANDE AVANÇO CONQUISTADO NAS ÚLTIMAS DÉCADAS, é cada vez mais comum o emprego de redes digitais na comunicação entre os componentes de um sistema de controle. Para garantir estabilidade e desempenho é necessário que as redes utilizadas sejam de alta qualidade de serviço (em inglês, *Quality of Service* — QoS). Os projetos de controle implementados digitalmente têm como premissa fundamental a utilização de canais de comunicação ideais, isto é, canais que não possuem perda de informação e nem atraso. Dependendo da dinâmica do sistema a ser controlado, é possível assumir que tecnologias cabeadas como *Ethernet* industrial [1], [2] ou de redes sem fio como *ultra-confiáveis* ou com baixa-latência (em inglês, *ultra-reliable* ou *low-latency*) [3], [4], sejam capazes de prover canais ideais. Por outro lado, essas tecnologias de alto QoS

têm o inconveniente de demandarem um elevado custo de implementação além de serem pouco flexíveis. Sendo assim, em situações em que não é possível assumir que o canal é ideal, uma alternativa é levar em conta as falhas de comunicação durante a fase de projeto dos controladores. Na literatura existem diversas técnicas que permitem considerar os efeitos indesejados associados ao uso de redes não ideais no projeto de sistemas de controle, dentre elas se destaca a classe de métodos pertencentes a área conhecida como sistemas de controle via rede (do inglês, *Networked Control Systems* — NCS) [5]. A teoria NCS viabiliza o projeto de controladores e filtros considerando os problemas inerentes às redes digitais como perda de pacotes, atraso e tempo de amostragem variante no tempo (não periódico). Como consequência, diferentemente dos projetos realizados utilizando a teoria clássica de controle, os projetos baseados em NCS fornecem garantias teóricas de estabilidade e desempenho em redes sujeitas a falhas.

Naturalmente, o melhor desempenho que pode ser obtido em um sistema de controle implementado digitalmente é quando a rede apresenta uma comunicação confiável (do inglês, *full-reliable*), isto é, sem perda de informação. Para garantir o nível de confiabilidade na recepção dos dados em uma rede *multi-hop*, geralmente um algoritmo é implementado na camada de transporte. Alguns destes algoritmos, por exemplo, o esquema de solicitação de repetição automática (em inglês, *Automatic Repeat reQuest* — ARQ) aumentam o valor esperado de recepções de sucesso entre a fonte e o destino [6]. Note que, para transmitir todos os dados sem perdas de informação, a rede de comunicação precisa empregar uma configuração (independentemente da topologia) que certamente consome mais recursos. Por outro lado, otimizar os critérios de desempenho (comumente baseados na minimização das normas \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞) no projeto de controladores consiste em um objetivo conflitante com o anterior, uma vez que requer a maximização do uso do canal na rede.

Dado que utilizar comunicação não-confiável (do inglês, *non-reliable*) ou semi-confiável (do inglês, *semi-reliable*) minimiza o consumo de recursos utilizados pela rede, foram desenvolvidas estratégias que utilizam esses tipos de comunicação e que, ao mesmo tempo, são capazes de fornecer resultados satisfatórios quando comparados aos obtidos com comunicação *full-reliable*. Como exemplo, pode-se mencionar o caso de transmissão de imagens por meio de redes empregando o algoritmo DSLJ-AL [7]. Esse algoritmo é capaz de reconstruir uma imagem recebida, mesmo em situações em que parte das informações (pacotes com os fragmentos da imagem) foi perdida, por meio de processos de reorganização e “*pacotização*”. Em contrapartida, a qualidade (nitidez) da imagem é reduzida pela perda dos pacotes [8, Figura 3.21].

Supported by CNPq (Grant 408782/2017-0), CAPES and FAPESP (Grant 2017/18785-5).

J. M. Palma, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil and Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile, jpalmao@dt.fee.unicamp.br

L. de P. Carvalho, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. carvalho.lp@usp.br

T. E. Rosa Faculty of Science and Engineering, University of Groningen, Groningen, The Netherlands, t.esteves.rosa@rug.nl

C. F. Morais, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, cfmorais@dt.fee.unicamp.br

R. C. L. F. Oliveira, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, ricfow@dt.fee.unicamp.br.

Corresponding author: Ricardo C. L. F. Oliveira

Assim, incorporar o efeito da perda de pacotes certamente acarreta em uma degradação na reconstrução da imagem, por outro lado, dependendo da aplicação final, a redução da nitidez pode ser aceitável, se considerada a economia de recursos obtida quando se utiliza um rede *semi-reliable* ao invés de uma *full-reliable*. Com base nessa técnica, foi proposto em [9], [10] um esquema chamado *trade-off* em filtragem de sistemas dinâmicos no contexto NCS. Nesses trabalhos foi observado que a imposição de um certo nível de degradação no desempenho do sistema dinâmico, medido em termos da norma \mathcal{H}_∞ , pode reduzir o consumo de energia em uma rede *semi-reliable multi-hop* ao regular o número de mensagens de *acknowledgment* (acusos de recepção) transmitidas, esquema análogo ao apresentado para o caso de transmissão de imagem [11]–[13]. Neste contexto, os projetos de NCS que admitem perda de sinais podem ser descritos em termos de sistemas lineares sujeitos a saltos markovianos (do inglês, *Markov Jump Linear Systems* — MJLS) a tempo discreto, os quais são capazes de modelar apropriadamente sistemas que sofrem mudanças abruptas em seu ponto de operação ou estrutura. A maior vantagem dessa modelagem é que existem na literatura condições que fornecem garantias teóricas de estabilidade e desempenho para essa classe de sistemas [14]. Tais condições são baseadas em desigualdades matriciais lineares (do inglês, *Linear Matrix Inequalities* – LMIs), as quais consistem em problemas de otimização convexa que podem ser resolvidos de maneira eficiente por algoritmos de complexidade polinomial [15].

Alguns dos trabalhos que investigam o projeto de filtros em comunicação *semi-reliable* com sistemas modelados em termos de MJLS discretos no tempo [9], [10], [16]–[19], avaliam o compromisso (*trade-off*) entre a degradação da norma \mathcal{H}_∞ (quando comparada à norma ótima) e a limitação do número máximo de transmissões permitidas por pacote quando são utilizados os esquemas de transporte *Hop-by-Hop* ou *End-to-end* [20], [21]. Nesse sentido, é importante enfatizar que, em redes *full-reliable* (canal de comunicação ideal), é possível projetar controladores \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ ótimos pela teoria de controle. Sendo assim, para avaliar o *trade-off* entre desempenho e economia de recursos é proposto um índice que relaciona o aumento da norma \mathcal{H}_∞ (com relação ao caso ótimo) e a redução do número global de transmissões (com relação a quantidade necessária para reproduzir o caso *full-reliable*, probabilidade de sucesso de transmissão de pacotes equivale a 100%). Esse índice ajuda o projetista a escolher o número máximo de transmissões de pacotes mais adequado ao desempenho requerido por alguma aplicação específica.

Motivado pela possibilidade de controlar a confiabilidade de redes em algumas aplicações (por exemplo, permitindo a deterioração dos níveis de desempenho durante a fase de projeto) e visando a redução do tráfego de informação na rede e a consequente economia de recursos energéticos, este artigo investiga o problema de controle por realimentação de estados em redes *multi-hop*, analisando a degradação de desempenho em termos das normas \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ dos sistemas em malha-fechada. Como mencionado anteriormente, na literatura existem trabalhos que seguem essa linha de pesquisa no contexto de filtragem \mathcal{H}_∞ [9], [10], [18], filtragem \mathcal{H}_2 [19] e em realimentação de saída [32] avaliando simultaneamente os

custos garantidos e o erro médio quadrático (do inglês, *Mean Square Error* – MSE) de estimação na saída do sistema.

O principal intuito desse artigo é utilizar a abordagem *Trade-off* para o projeto de controladores via realimentação de estados, adaptando o conjunto de experimentos apresentados em [19] (versão preliminar deste artigo) para o caso de controle de sistemas sujeitos a saltos Markovianos com canais Bernoulli. Observe que em um projeto de controle do tipo regulação, o objetivo é a minimização do valor esperado da energia (VEE) do sinal de saída controlado, implicando que o uso das normas \mathcal{H}_2 ou \mathcal{H}_∞ sejam apenas heurísticas auxiliares do projeto que buscam levar o sistema para a estabilidade e atenuar a influência da entrada de distúrbio na saída. Mais precisamente, o cenário a ser investigado é o controle por realimentação de estados implementado em uma arquitetura cliente-servidor, cujas medidas são transmitidas via redes *multi-hop* de comunicação *semi-reliable* tais que o processo de perda de pacotes possa ser modelado como uma cadeia de Markov. Adicionalmente, os saltos entre os modos de operação são governados por uma matriz de probabilidade de transição precisamente conhecida. As contribuições deste artigo são: *i*) analisar o comportamento da degradação das normas \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ com a redução da probabilidade de sucesso de transmissão dos sinais entre a planta e o controlador; *ii*) verificar a influência da distribuição inicial da cadeia de Markov sobre a norma \mathcal{H}_2 e o VEE; *iii*) avaliar o comportamento do VEE da saída controlada de acordo com o número máximo de transmissões de pacotes adotando as normas \mathcal{H}_2 ou \mathcal{H}_∞ como critérios de desempenho para o projeto de controladores; *iv*) analisar o comportamento do índice de *trade-off* entre os parâmetros de medida da rede e a variação da probabilidade de transmissões bem sucedidas associadas ao número máximo de transmissão de pacotes.

Notação: O conjunto dos números reais (naturais) é indicado por \mathbb{R} (\mathbb{N}). Para matrizes e vetores, o símbolo ($'$) representa transposição, enquanto (\blacksquare) significa blocos simétricos em matrizes quadradas. O símbolo $\mathcal{E}\{\cdot\}$ representa a esperança matemática. A classe de sinais estocásticos $\zeta(k) \in \mathbb{R}^r$, definida no domínio do tempo discreto $k \in \mathbb{N}$, tal que $\|\zeta\|_2^2 = \sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{E}\{\zeta(k)'\zeta(k)\}$ é finita, é indicada por \mathcal{L}_2 .

II. PRELIMINARES

Considere o seguinte MJLS discreto no tempo

$$G \triangleq \begin{cases} x(k+1) = A_{\theta_k}x(k) + B_{\theta_k}u(k) + E_{\theta_k}w(k), \\ z(k) = C_{z_{\theta_k}}x(k) + D_{z_{\theta_k}}u(k) + E_{z_{\theta_k}}w(k) \end{cases} \quad (1)$$

em que $x(k) \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $w(k) \in \mathbb{R}^m$ é a entrada de ruídos, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ corresponde a entrada de controle e $z(k) \in \mathbb{R}^s$ é a saída do sistema. A variável aleatória θ_k assume seus valores no conjunto finito $\mathbb{K} = \{1, 2, \dots, N\}$. A transição entre os N subsistemas depende da cadeia de Markov associada, com uma matriz de probabilidade de transição dada por $\mathbb{P} = [p_{ij}]$, em que $p_{ij} = \text{Prob}(\theta_{k+1} = j | \theta_k = i)$, e $p_{ij} > 0, \forall i, j \in \mathbb{K}$, $\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1$. Neste artigo é investigado o caso de distribuição de probabilidades Bernoulli generalizada,

de forma que o processo Markoviano é não correlacionado, ou seja, a probabilidade de sucesso associada ao modo $k + 1$ não depende do modo anterior k (i.e., $p_{ij} = p_j, \forall i \in \mathbb{K}$). Para facilitar a notação, sempre que $\theta_k = i$, escreve-se $A_{\theta_k} = A_i, B_{\theta_k} = B_i$ e assim por diante, para todo $i \in \mathbb{K}$.

Este artigo aborda o problema de projeto de uma lei de controle por realimentação de estados dada por $u(k) = K_i x(k)$, a qual fornece o seguinte MJLS em malha-fechada

$$G_k \triangleq \begin{cases} x(k+1) = (A_i + B_i K_i)x(k) + E_i w(k), \\ z(k) = (C_{z_i} + D_{z_i} K_i)x(k) + E_{z_i} w(k) \end{cases} \quad (2)$$

No projeto de controladores para o MJLS (2) é utilizado o conceito de estabilidade em média quadrada (do inglês, *mean square stability* – MSS) [14], o qual assegura que $\mathcal{E}[\|x(k)\|] \rightarrow 0$ à medida que $k \rightarrow \infty$ para qualquer condição inicial $x(0) \in \mathbb{R}^n, \theta_0 \in \mathbb{K}$.

A. Normas \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ como critérios de desempenho

Cálculo da norma \mathcal{H}_2 para MJLS: Uma definição formal da norma \mathcal{H}_2 aplicada aos MJLS é apresentada a seguir [22].

Definição 1: Suponha que (2) é MSS com condições iniciais nulas ($x(0) = 0$), e a entrada $w(k)$ é um impulso unitário discreto, então a norma \mathcal{H}_2 de (2) é definida como

$$\|G_k\|_2^2 := \sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^N \mu_i \|z(k)^{s,i}\|_2^2 \quad (3)$$

em que $\mu_i = \text{Prob}(\theta_0 = i \in \mathbb{K})$ é a distribuição de probabilidade inicial.

A norma \mathcal{H}_2 do MJLS (2) também pode ser computada numericamente por

$$\|G_k\|_2^2 := \sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{E}\{z(k)'z(k)\} \quad (4)$$

Toda vez que uma cadeia de Markov está em um estado estacionário, o que significa que os valores da probabilidade de transição já não variam, o resultado obtido pela equação (4) é o mesmo obtido por (3).

Cálculo da norma \mathcal{H}_∞ para MJLS: A norma \mathcal{H}_∞ é definida como a razão entre a norma da saída $z(k)$ para o sinal $w(k) \in \mathcal{L}_2$ de pior caso e a norma da entrada exógena $w(k)$. Uma das possíveis definições da norma \mathcal{H}_∞ do MJLS (2) é apresentada em [23], e reproduzida a seguir

$$\|G_k\|_\infty^2 := \sup_{0 \neq w \in \mathcal{L}_2, \theta_0 \in \mathbb{K}} \frac{\|z(k)\|_2^2}{\|w(k)\|_2^2} \quad (5)$$

B. Cálculo de controladores ótimos \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ para MJLS

Um ganho de realimentação de estados, dependente de modos, que minimiza a norma \mathcal{H}_2 do MJLS (2) com matriz de probabilidades Bernoulli pode ser obtido por meio do seguinte lema [24, Teorema 1].

Lema 1: Existe uma lei de controle dependente de modos na forma $u(k) = K_i x(k)$ tal que $\|G_k\|_2^2 < \rho^2$ se e somente se existirem matrizes simétricas W_i, X, Z_i , e matrizes Y_i de

dimensões compatíveis tais que as seguintes LMIs sejam satisfeitas para todo $i \in \mathbb{K}$

$$\begin{bmatrix} W_i & \blacksquare & \blacksquare \\ E_i & X & \blacksquare \\ E_{z_i} & 0 & I \end{bmatrix} > 0, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} Z_i & \blacksquare & \blacksquare \\ A_i X + B_i Y_i & X & \blacksquare \\ C_{z_i} X + D_{z_i} Y_i & 0 & I \end{bmatrix} > 0, \quad (7)$$

$$Z_p - X > 0, \quad (8)$$

Com $Z_p = \sum_{j \in \mathbb{K}} p_{ij} Z_j, \forall i \in \mathbb{K}$, e

$$\rho^2 = \inf_{(W_i, X, Z_i, Y_i) \in \eta} \sum_{i \in \mathbb{K}} \mu_i \text{Tr}(W_i), \quad (9)$$

em que η é o conjunto de todas as matrizes W_i, X, Y_i e Z_i satisfazendo (6), (7) e (8). Em caso afirmativo, o controlador ótimo \mathcal{H}_2 é dado por $K_i = -Y_i X^{-1}$.

Observe que a complexidade do problema de otimização descrito pelo Lema 1 aumenta se a norma de pior caso for procurada (i.e., se um limitante superior para a norma do MJLS independente da distribuição de probabilidade inicial μ_i for procurado). Nesse caso, basta substituir o problema (9) do Lema 1 por [25]

$$\rho^2 = \inf_{\varsigma, (W_i, X, Z_i, Y_i) \in \eta} \{\varsigma : \text{Tr}(W_i) < \varsigma\}. \quad (10)$$

Do mesmo modo, um ganho de realimentação de estados, dependente de modos, que minimiza a norma \mathcal{H}_∞ MJLS (2) com matriz de probabilidades Bernoulli pode ser obtido por meio do seguinte lema [24, Teorema 2].

Lema 2: Existe uma lei de controle dependente de modos na forma $u(k) = K_i x(k)$ tal que $\|G_k\|_\infty^2 < \gamma^2$ se e somente se existirem matrizes simétricas X, Z_i , e matrizes Y_i de dimensões compatíveis tais que (8) e a seguinte LMI sejam satisfeitas para todo $i \in \mathbb{K}$

$$\begin{bmatrix} Z_i & \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare \\ 0 & \gamma^2 & \blacksquare & \blacksquare \\ A_i X + B_i Y_i & E_i & X & \blacksquare \\ C_{z_i} X + D_{z_i} Y_i & E_{z_i} & 0 & I \end{bmatrix} > 0, \quad (11)$$

em que η é o conjunto de todas as matrizes X, Y_i e Z_i satisfazendo (8) e (11). Em caso afirmativo, o controlador ótimo \mathcal{H}_∞ é dado por $K_i = -Y_i X^{-1}$.

III. REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS EM REDES MULTI-HOP

Esta seção trata o problema de projetar um controlador por realimentação de estados em redes *multi-hop* sujeitas a perda de pacotes. A topologia adotada é ilustrada pela Fig. 1, representando o esquema implementado em uma arquitetura cliente-servidor [26]. Note que algumas adaptações foram feitas de modo que o controlador é considerado como o cliente e a planta é representada pelo servidor. As medidas do vetor de

estados $x(k)$ em (1) são transmitidas pela Planta (Fonte) por meio de múltiplos saltos (*hop*) e são recebidas pelo Controlador (Destino). No controlador é calculada a lei de controle $u(k)$ a qual é transmitida para a planta de maneira similar. Note que tanto na transmissão de $x(k)$ quanto na transmissão de $u(k)$ podem ocorrer erros na comunicação, ocasionando a perda de pacotes contendo os sinais. Para garantir o nível de confiabilidade na recepção dos dados em uma rede *multi-hop*, geralmente um algoritmo é implementado na camada de transporte (por exemplo, baseado em ARQ) aumentando o número esperado de transmissões bem-sucedidas entre a fonte e o destino. Os modelos de rede baseados em ARQ que geralmente são empregados na literatura são os esquemas *End-to-end* (aplicados principalmente em redes cabeadas) e *Hop-by-hop* (implementados no transporte e em camadas de *links* de dados de redes sem fio).

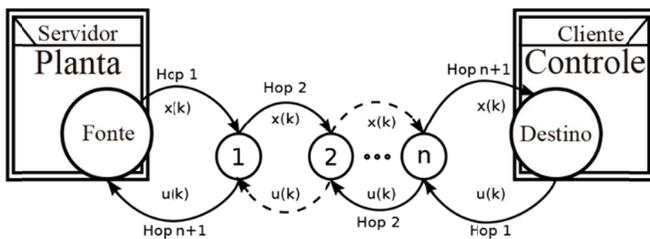


Figura 1. NCS baseado na arquitetura cliente-servidor [16], [26].

A teoria de controle clássico, utilizada para estabelecer condições de síntese de filtros e controladores, não contempla a perda de pacotes. Portanto, ela pode ser aplicada apenas em redes de comunicação totalmente confiáveis. Uma alternativa para satisfazer a exigência da rede *full-reliable* é utilizar algoritmos ARQ sem impor limitações às mensagens de *acknowledgement* (ACK). Essas abordagens demandam um alto consumo de recursos do hardware e canal. Por outro lado, a abordagem *trade-off* (investigada em [9], [10], [16]–[19] no contexto de filtragem) aplicada a controle por rede pode ser uma alternativa para minimizar o consumo de recursos em redes responsáveis por transmitir os sinais de medidas, ao limitar os parâmetros da rede que influenciam a probabilidade de sucesso (P_S) da transmissão de um pacote. Os parâmetros que determinam a probabilidade de sucesso são [9], [21]: o número de saltos (N), o número máximo de transmissões permitidas (L), a probabilidade de transmissão bem sucedida dos dados por salto (p_1) e a probabilidade de transmissão bem sucedida do sinal de *acknowledgement* (ACK) por salto (p_2). Empregando os esquemas de transporte de comunicação de redes mais usuais, a probabilidade de sucesso da transmissão de um pacote entre a fonte e o destino pode ser calculada por

$$\begin{cases} P_S^h = [1 - (1 - p_1^L)]^N, & \text{Hop-by-Hop} \\ P_S^e = 1 - (1 - p_1^N)^L, & \text{End-to-End} \end{cases} \quad (12)$$

Outro importante parâmetro das redes é o número global esperado de transmissões $\mathcal{E}(M)$, que está diretamente associado ao *hardware* e consumo do canal em um *link* de comunicação da rede. Esse parâmetro pode ser calculado analiticamente [9] ou via software [20].

IV. ESTUDO DE CASO

Nesta seção é investigada a relação entre as normas \mathcal{H}_∞ e \mathcal{H}_2 no projeto de controle via realimentação de estados e o VEE da saída controlada quando a probabilidade de falha na transmissão do sinal de controle ($u(k)$) varia, segundo o conjunto de experimentos apresentados em [19]. Para tal objetivo, são empregados valores numéricos extraídos do modelo linearizado em torno do ponto de equilíbrio estável de uma planta física que consiste em um pêndulo rotacional invertido, também conhecido como pêndulo de Furuta [27], [28]. A realização por espaço de estados para a planta contínua é dada por [29, página 54]

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 34.16 & -18.62 & 0.035 \\ 0 & -76.74 & 17.96 & -0.079 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \delta \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 18.31 \\ -17.65 \end{bmatrix},$$

$$C_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

em que δ é um escalar que pode assumir os seguintes valores $\{1, 1.5, 2\}$. O sistema é discretizado utilizando um segurador de ordem zero com um período de amostragem de 50ms. O modelo de falha utilizado é a abordagem *Zero-Input* [30]. De maneira sucinta, supondo que possa ocorrer uma falha de comunicação entre a planta e o controlador, a planta é modelada por um MJLS de dois modos (sucesso e falha) com A_i , E_i , C_{zi} , E_{zi} iguais a seus valores nominais para todo $i = 1, 2$, e B_i e D_{zi} iguais a seus valores nominais no caso de sucesso e nulas no caso de falha. Além disso, a transição entre os modos de operação (que representam acertos ou falhas) seguem uma distribuição de Bernoulli, o que significa que a matriz de probabilidade de transição possui linhas idênticas

$$\mathbb{P} = [1 \quad 1]' [P_S \quad (1 - P_S)]. \quad (14)$$

Uma discussão sobre o comportamento da norma \mathcal{H}_2 e o VEE da saída controlada para probabilidades de acertos de transmissões distintas e diferentes distribuições de probabilidade iniciais (μ_i) aplicadas a esse exemplo é apresentada na próxima seção.

A. Controle \mathcal{H}_2 e a distribuição de probabilidades iniciais

Um controlador projetado utilizando as condições do Lema 1 para o caso em que a perda dos pacotes não é considerada ($P_S = 1$) é equivalente ao projeto de controle por realimentação de estados \mathcal{H}_2 ótimo para um sistema linear invariante no tempo (do inglês, *Linear time-invariant* – LTI), produzindo um valor mínimo para a norma \mathcal{H}_2 . Por outro lado, se esse esquema de controle é implementado em uma rede *semi-reliable* ($P_S < 1$), o desempenho pode deteriorar (o valor da norma aumenta) e o sistema pode até mesmo tornar-se instável. Na teoria NCS, quando é utilizado um modelo markoviano para a perda dos pacotes do sinal controle $u(k)$, uma baixa probabilidade de sucesso da transmissão de pacotes (P_S) pode aumentar os limitantes superiores para a \mathcal{H}_2 e o comportamento do VEE da saída controlada. No entanto, a maneira como o custo garantido \mathcal{H}_2 e o VEE variam depende não somente da probabilidade P_S como também da dinâmica do sistema, e uma análise gráfica faz-se necessária.

Para o primeiro cenário, considera-se uma comunicação *semi-reliable* entre a planta e o controlador com uma probabilidade arbitrária P_S , e são negligenciados: o esquema de comunicação adotado, o número de saltos (*hops*) entre a planta e controlador, o número máximo de transmissões permitidas e a probabilidade de sucesso de transmissão entre os saltos. Para projetar o controlador por realimentação de estados \mathcal{H}_2 para o MJLS (1) via Lema 1 é necessário conhecer a distribuição de probabilidades inicial μ_i . De fato, como \mathbb{P} dada em (14) é Bernoulli, a distribuição de probabilidade a cada instante corresponde à mesma linha de \mathbb{P} , até mesmo no instante inicial. Por esse motivo, a primeira escolha para a distribuição de probabilidade é $\mu(1) = [P_S \ (1 - P_S)]$. As outras duas escolhas são $\mu(2) = [1 \ 0]$ e $\mu(3) = [0 \ 1]$, que representam, respectivamente, que o estado inicial (sucesso ou falha) da transmissão do sinal de controle é conhecido, certamente uma hipótese forte. Uma quarta alternativa é supor que a distribuição inicial é uma variável adicional do problema de otimização, gerando um controlador com custo garantido baseado na distribuição de probabilidade de pior caso $\mu(4)$, como visto na equação (10).

Na Fig. 2 é apresentado o comportamento da norma \mathcal{H}_2 versus P_S , para cada escolha de μ e valores de δ pertencentes ao conjunto $\{1, 1.5, 2\}$. Observe que, quanto maior a proba-

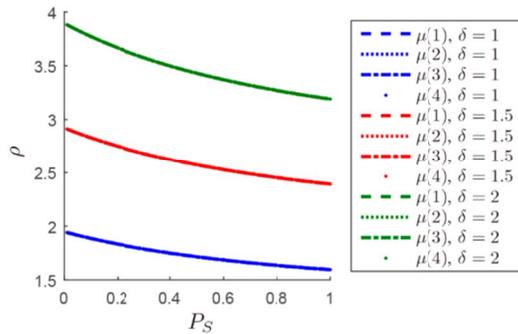


Figura 2: Custo garantido \mathcal{H}_2 (ρ) do MJLS (2) para diferentes valores de δ e distribuição de probabilidades iniciais ($\mu(1) = [P_S \ (1 - P_S)]$, $\mu(2) = [1 \ 0]$, $\mu(3) = [0 \ 1]$ e $\mu(4) = \text{eq. (10)}$ versus a probabilidade de sucesso na transmissão do sinal de controle $u(k)$ (P_S).

bilidade de sucesso de transmissão do sinal de controle, menor o custo garantido \mathcal{H}_2 , independente dos valores μ e δ empregados.

Para uma distribuição de probabilidades inicial conhecida (como $\mu(1)$, $\mu(2)$, ou $\mu(3)$), o Lema 1 é uma condição necessária e suficiente (que fornece o valor ótimo da norma \mathcal{H}_2 do MJLS (1)). Por outro lado, utilizando a equação (10), o Lema 1 gera apenas um limitante superior (custo garantido) a norma do MJLS (1) para todas distribuições de probabilidade iniciais possíveis, inclusive a de pior caso. Mesmo assim, observa-se na Fig. 2 que para o estudo de caso investigado, com apenas dois modos de operação, o custo garantido \mathcal{H}_2 independe da distribuição de probabilidade inicial. Essa propriedade é o oposto ao apresentado em [19] (versão preliminar deste trabalho) em que é investigada a influência da distribuição de probabilidade inicial em projetos de filtros em MJLS. No contexto de filtragem, observou-se que a distribuição de probabilidades iniciais é um fator decisivo para o desempenho do sistema (ver [19, Figura 2]).

Embora o projeto de controle \mathcal{H}_2 tenha sido realizado para quatro diferentes funções objetivos ($\sum_{i \in \mathbb{K}} \mu_i \text{Tr}(W_i)$) associadas a quatro distribuições de probabilidades iniciais μ_i distintas, observou-se que os ganhos computados são numericamente semelhantes (considerando um truncamento na quinta casa decimal). Para efeito ilustrativo, considere uma probabilidade de sucesso $P_S = 0.5$ e parâmetro $\delta = 1$. Nesse caso, os ganhos calculados pelo Lema 1 para $\mu = \mu(1)$, $\mu = \mu(2)$, $\mu = \mu(3)$, ou $\mu = \mu(4)$ são todos equivalentemente dados por

$$K_1 = [0 \ 1.2185 \ 0.0250 \ 0.7368],$$

$$K_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Observe que, como os ganhos projetados são idênticos entre si independentemente do valor de μ , o VEE da saída controlada (que depende diretamente dos ganhos) também não será alterado. É importante enfatizar que no contexto markoviano, mesmo que os valores computados para os custos garantidos sejam os mesmos, as matrizes dos ganhos, e consequentemente as matrizes do sistema em malha-fechada não são necessariamente iguais, diferentemente do que ocorreu nesse exemplo (ver [31]).

B. Controle \mathcal{H}_∞

Ao utilizar a norma \mathcal{H}_∞ como critério de desempenho para o projeto do controlador por realimentação de estados para o MJLS (1), procura-se aumentar a robustez do sistema, minimizando a influência da entrada de ruídos na saída. Outra particularidade do critério de desempenho \mathcal{H}_∞ em MJLS é a não dependência da distribuição de probabilidade inicial na etapa de projeto.

Considerando o mesmo cenário apresentado anteriormente: uma comunicação *semi-reliable* entre a planta e o controlador com probabilidade arbitrária (P_S) de sucesso de transmissão do sinal de controle entre a fonte e o destino e desconsiderando o esquema de comunicação, o número de saltos, o número máximo de transmissões permitidas ou a probabilidade entre os saltos. Diferentemente do caso \mathcal{H}_2 , para projetar o controlador por realimentação de estados \mathcal{H}_∞ para o MJLS (1) via Lema 2, não é necessário conhecer a distribuição de probabilidades inicial μ_i . Adicionalmente, assim como apresentado anteriormente, a matriz de probabilidades (14) é Bernoulli. A Fig. 3 apresenta os custos garantidos \mathcal{H}_∞ em função da probabilidade P_S . Observe que, conforme esperado, o custo garantido diminui com o aumento de P_S , adicionalmente, a redução de γ apresentada na Fig. 3 é mais acentuada que a redução de ρ na Fig. 2 com o aumento da probabilidade P_S e de acordo com os valores de δ . Note que, a degradação da norma é uma característica importante a ser considerada para limitar o consumo de recursos energéticos da rede, associado ao valor esperado da energia (VEE) da saída controlada.

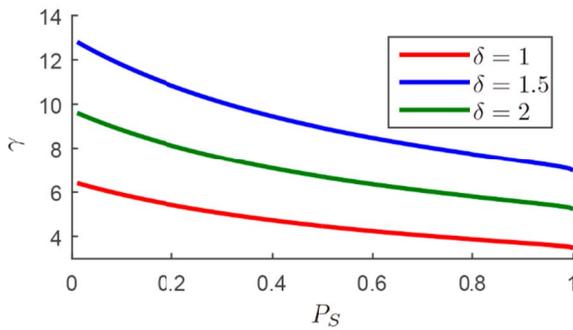


Figura 3: Custo garantido \mathcal{H}_∞ gama do MJLS (2) para diferentes valores de δ versus a probabilidade de sucesso na transmissão do sinal de controle.

V. CONTROLE EM REDES MULTI-HOP

Embora todos os resultados previamente discutidos tenham sido definidos em termos de uma probabilidade de sucesso de transmissão do sinal de controle entre a fonte e o destino (P_S) arbitrária, quando uma rede de comunicação (com probabilidade de sucesso entre os nós p_1, p_2 , e um número de saltos N) é definida para um esquema de transporte dado, a probabilidade de sucesso deixa de ser arbitrária e é dada por (12) para os esquemas *Hop-by-Hop* e *End-to-End*. Assim, os resultados apresentados daqui em diante são descritos em termos de um número máximo de transmissões permitidas L , o qual representa uma variável de decisão do projeto. Com a intenção de comparar quantidades de dimensões diferentes, são definidos índices normalizados de acordo com o procedimento de normalização proposto em [19], e apresentados a seguir:

- Y_{H_a} : a razão entre a norma H_a (\mathcal{H}_∞ ou \mathcal{H}_2) considerando a perda nos pacotes ($P_S < 1$) e a norma obtida com o controlador ótimo sem perdas ($P_S = 1$).
- $Y_{VEE}^{H_a}$: a razão entre o VEE da saída controlada considerando a perda nos pacotes ($P_S < 1$) e uma transmissão em *full-reliable* ($P_S = 1$).

Quando $Y = 1$, a comunicação é *full-reliable*, isto é, uma malha de controle clássico com os menores valores das normas \mathcal{H}_∞ e \mathcal{H}_2 , e seus respectivos VEE. Utilizando a topologia de redes explicada na Seção I com os valores numéricos descritos em [19], isto é, a rede *multi-hop* da Fig. 1 com 10 nós intermediários ou $N = 11$ saltos, e considerando uma probabilidade de sucesso por rota de $p_1 = p_2 = p = 0.5$ para toda a rede, a probabilidade de sucesso de um pacote de transmissão P_S dependerá somente do número máximo de transmissões permitidas L e do esquema de transporte como previsto em (12). Ao limitar o número máximo de transmissões permitidas (L), a probabilidade de sucesso (P_S) é reduzida, porém o consumo de recursos na rede é minimizado, fenômeno que foi previamente investigado em [9], [10], [16]–[19]. Como a relação entre o consumo energético e o máximo número de transmissões permitidas (L) foi extensivamente estudado na literatura, o foco desta seção é investigar apenas o comportamento do VEE da saída controlada em função da diminuição de L (redução da confiabilidade da rede), para projeto de controladores associados a diferentes critérios de desempenho (minimização da norma \mathcal{H}_2 ou \mathcal{H}_∞), visando

determinar qual critério está relacionado aos melhores resultados.

A avaliação temporal dos controladores é feita conforme a simulação de Monte Carlo considerando 5×10^4 iterações em dois casos:

1. O sistema com condições iniciais nulas e uma janela de¹ tempo de $K_m = 150$ amostras com uma entrada exógena

$$w(k) = \sin(0.32k + 0.36) \quad (15)$$

A simulação de Monte Carlo permite o cômputo da estimação do VEE da saída controlada utilizando a seguinte equação

$$VEE_M = \frac{1}{K_m} \sum_{k=0}^{K_m-1} \mathcal{E}\{z(k)'z(k)\} \quad (16)$$

2. O sistema com entrada exógena nula e condições iniciais dadas por

$$x(0) = [-2 \ 2 \ 0 \ 0]' \quad (17)$$

para as quais calcula-se a norma sobre a saída conforme a equação (2), tanto nos projetos \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ , via Monte Carlo utilizando uma janela de tempo de $K_m = 150$ amostras.

A Fig. 4 apresenta o comportamento das normas e do VEE da saída controlada com relação ao número máximo de transmissões permitidas (lembrando que quanto maior L , maior P_S). As Figs. 4a e 4b mostram a degradação (Y_{H_a}) das normas \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ de acordo com L . É possível observar que o aumento percentual da norma \mathcal{H}_∞ é mais acentuado do que para a norma \mathcal{H}_2 , ao limitar L . Entretanto, como as normas estão associadas à otimização de critérios distintos, e o interesse deste artigo é obter a menor energia no sinal de saída, em seguida avaliamos o comportamento do VEE da saída controlada para uma dada condição inicial e um dado critério de desempenho. As Figs. 4c e 4d mostram os $Y_{VEE}^{H_a}$ de ambas as normas para entrada exógena $w(k)$ nula com condições iniciais dadas por (6). Observe que, diferentemente do observado para o projeto \mathcal{H}_2 , o VEE da saída controlada associada ao projeto \mathcal{H}_∞ é superior em malha-fechada ($L > 0, P_S > 0$) do que em malha-aberta ($L = 0, P_S = 0$) e tende a piorar com o aumento de L e com a melhoria do custo garantido \mathcal{H}_∞ , o que é um resultado contraintuitivo. A diferença entre os projetos fica ainda mais evidente quando comparamos os valores médios absolutos (não normalizados) de VEE (16) associados aos critérios \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ como mostrado na Fig. 4g. Note que a energia da saída controlada chega a ser 1500% maior para o projeto \mathcal{H}_∞ , o que justificaria a escolha do critério \mathcal{H}_2 para sistemas com entradas exógenas impulsivas ($w(k) = 0, x(0) \neq 0$).

Por outro lado, quando a entrada exógena é não-nula, como a função senoidal descrita pela equação (15), observamos que o comportamento do VEE é similar para as projetos \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ ,

¹ Foi observado que para um sinal de entrada impulsivo aplicado à planta desse exemplo, a janela de tempo de é grande o suficiente para $K = 150$ é grande o suficiente para computar (4).

como ilustrado pelas Figs. 4e e 4f. Embora não observado nos gráficos normalizados das Figs. 4e e 4f, no caso de $w(k)$ dada por (15), o método \mathcal{H}_∞ apresenta uma vantagem persistente (para todos valores de L) no valor médio de VEE (16), como mostrado na Fig. 4h (diferença percentual de até 35% entre o VEE associado ao projeto \mathcal{H}_∞ e ao projeto \mathcal{H}_2 em função de L para $w(k)$ senoidal).

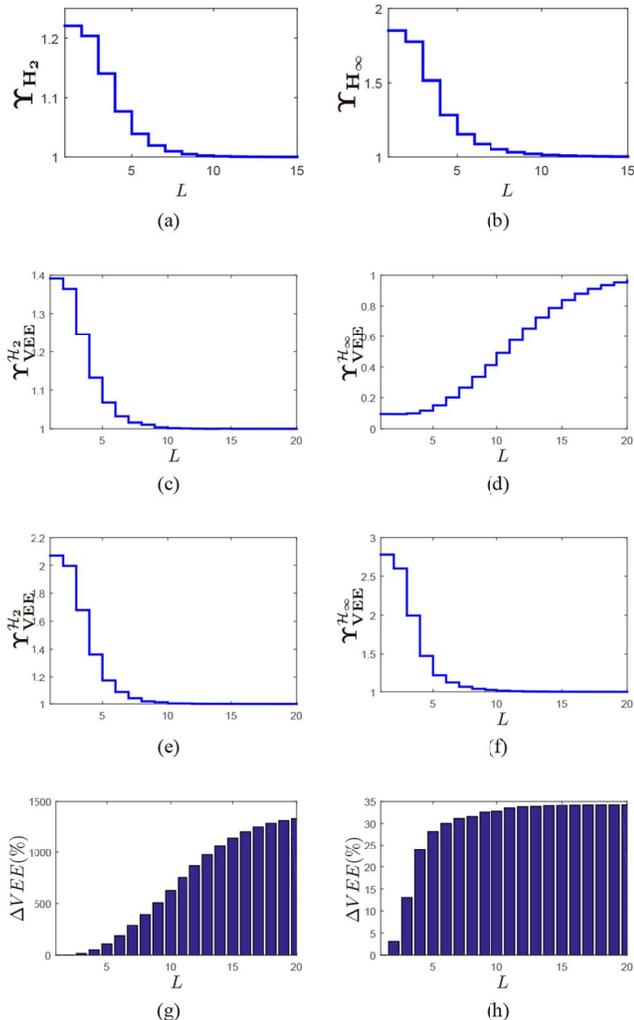


Figura 4: Comportamento das normas e do VEE da saída controlada versus número máximo de transmissões permitidas (L): (a) Degradação da norma $\mathcal{H}_2(\gamma_{H_2})$; (b) Degradação da norma $\mathcal{H}_\infty(\gamma_{H_\infty})$; (c) Degradação do VEE para o projeto $\mathcal{H}_2(\gamma_{VEE}^{H_2})$ para $w(k) = 0$ e $x(0)$ dado em (17); (d) Degradação do VEE para o projeto $\mathcal{H}_\infty(\gamma_{VEE}^{H_\infty})$ para $w(k) = 0$ e $x(0)$ dado em (17); (e) Degradação do VEE para o projeto $\mathcal{H}_2(\gamma_{VEE}^{H_2})$ para $x(0) = 0$ e $w(k)$ dado em (16); (f) Degradação do VEE para o projeto $\mathcal{H}_\infty(\gamma_{VEE}^{H_\infty})$ para $x(0) = 0$ e $w(k)$ dado em (16); (g) Diferença percentual do VEE médio para $w(k) = 0$ e $x(0)$ dado em (17) ($\Delta VEE(\%) = (VEE_M(\mathcal{H}_\infty) - VEE_M(\mathcal{H}_2)) / VEE_M(\mathcal{H}_2)\%$); (h) Diferença percentual do VEE médio para $x(0) = 0$ e $w(k)$ dado em (15) ($\Delta VEE(\%) = (VEE_M(\mathcal{H}_2) - VEE_M(\mathcal{H}_\infty)) / VEE_M(\mathcal{H}_\infty)\%$).

Finalmente, observe que a carga de dados na rede (*network load*) pode ser minimizada com a redução do número máximo de transmissões permitidas (consequentemente, pior probabilidade de sucesso de transmissão de dados), porém, como demonstrado na Fig. 4, isso implica, no caso geral, em uma degradação tanto nas normas \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ , quanto no VEE da saída controlada. No entanto, se uma certa degradação de

desempenho for permitida pelo projetista sem prejuízo à estabilidade do sistema, ou ao propósito da implementação do controlador, é possível obter economia de recursos na rede de comunicação sem incrementar excessivamente a energia da saída controlada.

IV. CONCLUSÃO

Após avaliar o projeto de controladores \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ por realimentação de estados para uma planta conectada a uma rede de comunicação *semi-reliable*, foi observado que para o caso de estudo: *i*) o desempenho do controlador \mathcal{H}_2 (bem como o valor dos ganhos computados e consequentemente o VEE da saída controlada) não depende da distribuição de probabilidade inicial, diferentemente do que foi observado no projeto de filtragem desenvolvido em [19]; *ii*) existe a possibilidade de que sejam obtidos VEE maiores ao empregar controladores associados a custos garantidos \mathcal{H}_∞ sendo que, no caso em que o sistema possui entrada exógena nula e condições iniciais dadas, o controlador \mathcal{H}_2 gera resultados muito mais favoráveis; *iii*) quando as condições iniciais são nulas e a entrada exógena é não nula, o projeto associado ao controlador \mathcal{H}_∞ pode produzir resultados melhores em termos de VEE.

Considerando um esquema de transporte *Hop-by-hop* em uma rede *multi-hop* e tomando o número máximo de transmissões por pacote (L) como uma variável de decisão, foi mostrado que é possível selecionar um valor adequado de L para cumprir os critérios de desempenho e, simultaneamente, obter um melhor uso do canal como previsto em [9], [10], [18], [19]. Tendo como base os resultados obtidos nesse artigo, o próximo passo é realizar o projeto de sistemas de controle baseados em eventos, levando em consideração a interação entre a rede e o controlador.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Skeie, S. Johannessen, and O. Holmeide, "Timeliness of real-time IP communication in switched industrial Ethernet networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 2, no. 1, pp. 25–39, February 2006.
- [2] J. Jasperneite, M. Schumacher, and K. Weber, "Limits of increasing the performance of industrial ethernet protocols," in *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFAT 2007)*, September 2007, pp. 17–24.
- [3] N. A. Johansson, Y. P. E. Wang, E. Eriksson, and M. Hessler, "Radio access for ultra-reliable and low-latency 5G communications," in *Proceedings of the IEEE International Conference on CommunicationWorkshop (ICCW)*, London, United Kingdom, June 2015, pp. 1184–1189.
- [4] N. Brahmi, O. N. C. Yilmaz, K. W. Helmersson, S. A. Ashraf, and J. Torsner, "Deployment strategies for Ultra-Reliable and Low-Latency communication in factory automation," in *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, San Diego, CA, USA, December 2015, pp. 1–6.
- [5] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, January 2007.
- [6] S. Lin, D. J. Costello, and M. J. Miller, "Automatic-repeat-request error-control schemes," *IEEE Communications Magazine*, vol. 22, no. 12, pp. 5–17, December 1984.
- [7] E. Orellana, J. SanMartin, C. Duran-Faundez, V. Lecuire, and K. Zapata-Quinones, "Evaluation of block interleaving techniques for robust image

- communication in wireless camera sensor networks,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSE)*, Subang, Selangor, Malaysia, October 2014, pp. 90–95.
- [8] E. Orellana and J. SanMartin, “Diseño e implementación de una plataforma de evaluación de técnicas de entrelazamiento de bloques para la comunicación robusta de imágenes sobre redes de sensores inalámbricos,” Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile, Undergraduate thesis, 2014.
- [9] J. M. Palma, L. P. Carvalho, A. P. C. Gonçalves, C. E. Galarza, and A. M. de Oliveira, “Application of control theory Markov systems to minimize the number of transmissions in a multi-hop network,” in *Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering*, Quito, Ecuador, July 2015, pp. 296–301.
- [10] J. M. Palma, L. P. Carvalho, A. P. C. Gonçalves, C. E. Galarza, and A. M. de Oliveira, “Networked control systems application: Minimization of the global number of interactions, transmissions and receptions in multi-hop network using discrete-time Markovian jump linear systems,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 6, pp. 2675–2680, June 2016.
- [11] V. Lecuire, C. Duran-Faundez, and N. Krommenacker, “Energy-efficient transmission of wavelet-based images in wireless sensor networks,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2007, no.047345, pp. 1–11, January 2007.
- [12] —, “Energy-efficient image transmission in sensor networks,” *International Journal of Sensor Networks*, vol. 4, no. 1-2, pp. 37–47, 2008.
- [13] D. G. Costa and L. A. Guedes, “A discrete wavelet transform (DWT)-based energy-efficient selective retransmission mechanism for wireless image sensor networks,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 3–35, February 2012.
- [14] O. L. V. Costa, M. D. Fragoso, and R. P. Marques, *Discrete-Time Markovian Jump Linear Systems*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2005.
- [15] J. F. Sturm, “Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones,” *Optimization Methods and Software*, vol. 11, no. 1–4, pp. 625–653, 1999, <http://sedumi.ie.lehigh.edu/>.
- [16] J. M. Palma, L. P. Carvalho, A. M. de Oliveira, A. P. C. Gonçalves, and C. Duran-Faundez, “Minimizing the number of transmissions in a multi-hop network for the dynamical system filtering problem and the impact on the mean square error,” in *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automação Inteligente*, Natal, RN, Brasil, Outubro 2015, pp. 1–6.
- [17] J. M. Palma, L. P. Carvalho, and A. P. C. Gonçalves, “An approach to energy efficiency in a multi-hop network control system through a trade-off between H_∞ norm and global number of transmissions,” in *VIII Encontro dos Alunos e Docentes do Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial*, Campinas, SP, Brazil, September 2015, pp. 1–4.
- [18] J. M. Palma, “Trade-Off entre norma H-infinito e transmissões globais aplicado a projetos de filtragem através da rede,” M.Sc. Thesis, FEEC – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil, Maio 2016.
- [19] J. M. Palma, L. P. Carvalho, T. E. Rosa, C. F. Morais, and R. C. L. F. Oliveira, “H2 filtering through multi-hop networks: Trade-off analysis between the network consumption and performance degradation,” in *Proceedings of the 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucon, Chile: IEEE, October 2017.
- [20] C. E. Galarza and J. M. Palma, *Package ‘hopbyhop’: Transmissions and Receptions in a Hop by Hop Network*, 2nd ed., September 2016. [Online]. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=hopyhop>
- [21] S. Heimlicher, M. Karaliopoulos, H. Levy, and M. May, “End-to-end vs. Hop-by-hop transport under intermittent connectivity,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Autonomic Computing and Communication Systems*, Rome, Italy, 2007, pp. 1–20.
- [22] J. B. R. do Val, J. C. Geromel, and A. P. C. Gonçalves, “The H2-control for jump linear systems: Cluster observations of the Markov state,” *Automatica*, vol. 38, no. 2, pp. 343–349, February 2002.
- [23] O. L. V. Costa and J. B. R. do Val, “Full information H_∞ -control for discrete-time infinite Markov jump parameter systems,” *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 202, no. 2, pp. 578–603, September 1996.
- [24] A. R. Fioravanti, A. P. C. Gonçalves, and J. C. Geromel, “Optimal H2 and H_∞ mode-independent control for generalized Bernoulli jump systems,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control — Transactions of ASME*, vol. 136, no. 1, pp. 011 004–011 004–6, January 2014.
- [25] A. R. Fioravanti, A. P. C. Gonçalves, and J. C. Geromel, “H2 filtering of discrete-time Markov jump linear systems through linear matrix inequalities,” *International Journal of Control*, vol. 81, no. 8, pp. 1221–1231, 2008.
- [26] F.-Y. Wang and D. Liu, *Networked Control Systems: Theory and Applications*, 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2008.
- [27] Quanser, “Quanser innovation-educate rotary inverted pendulum,” www.quanser.com/products/rotary_pendulum, Tech. Rep., [Online; accessed 1-July-2017].
- [28] B. S. Cazzolato and Z. Prime, “On the dynamics of the Furuta pendulum,” *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2011, pp. 3:1–3:8, January 2011.
- [29] A. M. de Oliveira, “Análise e controle de um sistema mecânico com dados transmitidos através da rede,” Master’s thesis, FEEC, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, August 2015.
- [30] L. Schenato, “To zero or to hold control inputs with lossy links?” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 5, pp. 1093–1099, May 2009.
- [31] J. M. Palma, C. F. Morais, L. P. Carvalho, and R. C. L. F. Oliveira, “Modelo de canal markoviano para projetos de filtros H_∞ em redes multi-rotas,” in *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automação Inteligente, Porto Alegre, RS, Brasil, October 2017*.
- [32] J. M. Palma, C. Duran-Faundez, L. P. Carvalho, C. F. Morais, R. C. L. F. Oliveira, E. Rubio and K. Herman, “Protocol for Energy-Efficiency in Networked Control Systems Based on WSN,” in *Sensors*, 2018, vol. 18, no 8, p. 2590.



Jonathan Matias Palma Olate (03/11/1989). Formado em Engenharia de Ejecución en Electrónica, pela Universidade del Bio-Bio, Concepcion, Chile em 2014. Mestre em Engenharia Elétrica (2016) e estudante de Doutorado (2016-atual) na Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, sob a orientação do professor Dr. R.C. L. F. Oliveira e co-orientação da Dra. C. F. Morais. Atua nos seguintes temas: NCS, modelagem de controladores em WSN e controle e filtragem de sistemas markovianos e lineares variantes no tempo.



Leonardo de Paula Carvalho. Formado em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil em 2012. Mestrado na Universidade Estadual de Campinas no Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial. Cursando Doutorado na Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. Atua principalmente no tema de controle em rede.



Tábitha Esteves Rosa. Possui graduação em Engenharia Mecatrônica pelo CEFET-MG (Brasil, 2014). Obteve o título de Mestra em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil (2017), com foco em controle robusto, investigando principalmente controladores por realimentação de saída para sistemas com parâmetros variantes no tempo. Atualmente é aluna de doutorado e pesquisadora na University of Groningen (Holanda), trabalhando sobre o problema de integrar controladores baseados em modelos e guiados por dados para sistemas de controle de fabricação com zero defeitos.



Cecília de Freitas Morais. Nascida em Goiânia/GO, Brasil, em 1987, graduou-se Engenheira Eletricista pela Universidade Federal de Goiás (2008) e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (DSEE) da Universidade Estadual de Campinas (fev/2011). Obteve o título de Doutora em Engenharia Elétrica pelo Departamento de Sistemas de Energia (DSE) da FEEC/Unicamp (2015), onde permanece como pesquisadora de pós-doutorado desenvolvendo trabalhos nas áreas de controle, processamento de sinais, análise de estabilidade de sistemas dinâmicos, sistemas markovianos e discretização de sistemas incertos.



Ricardo C. L. F. Oliveira. Nascido em Assis Chateaubriand, Paraná, Brasil em 1978. Possui graduação em Engenharia de Computação pela PUC-PR (2000), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela FEEC-UNICAMP (2003, 2006). Atualmente é Professor Doutor II (MS3.2) na FEEC-UNICAMP. Atua nos seguintes temas: análise e controle robusto de sistemas dinâmicos sujeitos a incertezas (sistemas lineares incertos, variantes no tempo, estocásticos e nebulosos) por meio de otimização convexa; simulação de edificações.