



DINCON 2017

CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES

30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Implementação de Controle LQG em Rede Sujeita a Perda de Pacote para um Sistema de Nível

Guilherme Mendes Cicarini Hott¹

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, MG

Fernando Henrique Duarte Guaracy²

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, MG

Resumo. O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de aplicações em que dispositivos que aquisitam dados, atuam na planta e processam algoritmos de controle estejam isolados fisicamente, mas conectados por redes de comunicação. As redes de comunicação estão sujeitas a não idealidades como limitação de banda, atrasos e perdas de pacote. Este artigo apresenta a aplicação de uma estratégia de controle LQG para um sistema de nível em que o canal de comunicação, no qual os dados do sensor são enviados ao controlador, está sujeito a perda de pacotes. Nesse artigo, considera-se que há o reconhecimento da chegada ou não do pacote, característica de um protocolo do tipo TCP, e a partir destas informações, obtém-se uma estimativa ótima dos estados da planta. Os ensaios práticos apresentados mostram que a técnica pode ser utilizada com sucesso em situações reais.

Palavras-chave. Controle LQG, sistemas de controle em rede, perda de pacote, protocolo TCP.

1 Introdução

A princípio, as teorias de controle possuíam foco em estudar a dinâmica do sistema e implementar técnicas de controle com o objetivo de atingir requisitos definidos, tratando como ideal a comunicação entre controladores, atuadores e sensores [1]. A evolução dos ambientes fabris e dos processos a serem controlados, em conjunto com o desenvolvimento das tecnologias envolvidas em malhas de controle têm trazido novas topologias, nas quais sensores e atuadores estão dispersos na planta, fazendo-se assim necessário o uso de meios de comunicação para a transmissão de informações.

¹guilhermemendes@unifei.edu.br

²fernandoh@unifei.edu.br

O uso de redes de comunicação em malhas de controle apresenta funcionalidades diferenciadas. Além dos componentes constituintes estarem separados fisicamente, a mesma rede pode ser requisitada para diferentes plantas e seus respectivos atuadores e sensores, unificando o meio físico de transmissão e podendo acarretar em economias relacionadas a cabeamento e transmissão de informações [2].

A estrutura geral de um sistema de controle em rede (*Networked Control System – NCS*) é vista na Figura 1.

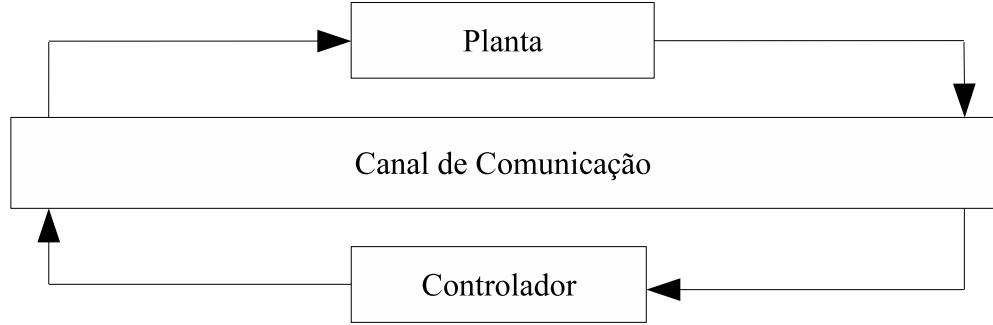


Figura 1: Sistema de Controle em Rede.

A transmissão de dados pode ser feita por diferentes tipos de protocolos, sendo os mais comuns TCP (*Transmission Control Protocol*) e UDP (*User Datagram Protocol*) [3]. O protocolo UDP possui maior velocidade comparado ao TCP, que apresenta a característica de confirmação de recebimento ou não da mensagem.

Canais de comunicação estão propícios a limitações de banda, atrasos e perdas de dados durante o processo [4], o que pode impossibilitar a implementação de controladores convencionais. Nesse contexto, este artigo apresenta a implementação de uma estratégia de controle LQG [5] em um sistema propício a perdas de pacote modeladas por variáveis de Bernoulli [6], apresentando resultados práticos em um sistema de nível. O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre a estratégia de controle com perdas de pacote. A Seção 3 apresenta o sistema de nível em questão e a Seção 4 traz o projeto do controlador e os resultados práticos obtidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as considerações finais e indicações de trabalhos futuros.

2 Estimação e controle ótimo em redes com perdas de pacotes

Considere o sistema modelado por

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k^r + w_k \quad (1)$$

$$u_k^r = \nu_k u_k \quad (2)$$

$$y_k = \gamma_k Cx_k + v_k \quad (3)$$

em que A é a matriz de estado, B é a matriz de entrada, C é a matriz de saída, x_k é o vetor de variáveis de estado, u_k^r é o vetor de entradas, w_k é o distúrbio de processo, u_k é a saída do controlador, y_k é o vetor de saídas, v_k é o ruído de medição [5]. As variáveis ν_k e γ_k modelam as perdas de pacote, referentes à não idealidade do canal de comunicação no envio do sinal de controle e na leitura da saída, respectivamente, as quais assume-se que são variáveis aleatórias de Bernoulli cujas probabilidades de sucesso na entrega de mensagem são dadas, respectivamente, por

$$\mathcal{P}(\gamma_k = 1) = \bar{\gamma} \quad \text{e} \quad \mathcal{P}(\nu_k = 1) = \bar{\nu} \quad (4)$$

Com a informação de leitura do sensor e de perda de pacote implementa-se a estimação do estado da planta, que possui papel essencial para o algoritmo de controle. Utiliza-se uma modificação no equacionamento do filtro de Kalman convencional, conforme proposto em [5], levando em conta a informação de perda na leitura da dinâmica do sistema, fazendo com que o passo de correção não seja executado quando ocorra uma perda de pacote em determinado instante de amostragem. O passo de inovação é dado por

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k} + \nu_k Bu_k \quad (5)$$

$$P_{k+1|k} = AP_{k|k}A' + Q \quad (6)$$

e o passo de correção por

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + \gamma_{k+1}K_{k+1}(y_{k+1} - C\hat{x}_k) \quad (7)$$

$$P_{k+1} = P_k - \gamma_{k+1}K_{k+1}CP_k \quad (8)$$

$$K_{k+1} = P_kC'(CP_kC' + R)^{-1} \quad (9)$$

sendo Q e R as matrizes de covariâncias de w_k e v_k , respectivamente, $\hat{x}_k$ a estimação, K o ganho do filtro e P a matriz de covariância do erro de estimação.

O cálculo do ganho de realimentação é feito de forma recursiva e sinal de controle ótimo é calculado por

$$u_k = -(B'S_{k+1}B + U)^{-1}B'S_{k+1}A\hat{x}_{k|k} = L_k\hat{x}_{k|k} \quad (10)$$

em que L_k é o vetor de ganhos do controlador e S_{k+1} é calculado recursivamente por

$$S_k = A'S_{k+1}A + W - \bar{\nu}A'S_{k+1}B(B'S_{k+1}B + U)^{-1}B'S_{k+1}A \quad (11)$$

sendo W e U as matrizes de ponderações associadas à dinâmica e consumo de energia, respectivamente [5]. Deste modo, o sistema de controle em rede resultante pode ser visto na Figura 2.

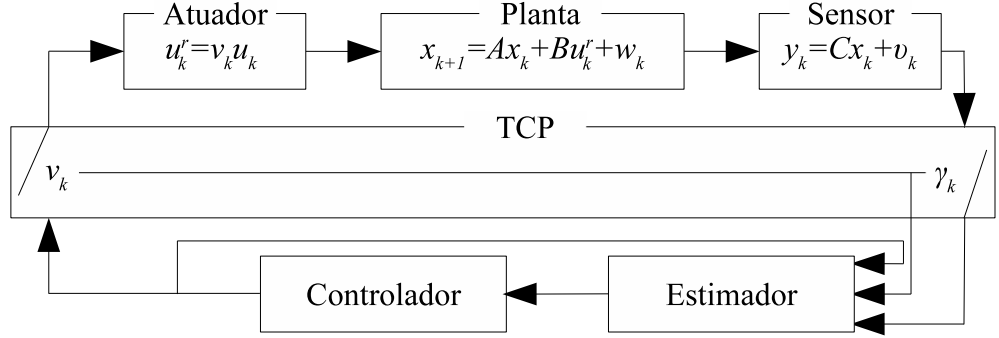


Figura 2: Sistema de Controle em Rede - Modelo completo.

3 Sistema de Nível

A planta de nível utilizada é o modelo XC220 fabricada pela EXSTO (Figura 3), composta por dois tanques, bomba, válvula manual e transmissor de pressão para medição de nível. A interface utilizada foi o NI Elvis II como conversor AD/DA e a execução do algoritmo do controlador e a simulação da perda são realizadas em um computador.



Figura 3: Planta de Nível Exsto XC220. – [7]

O processo pode ser representado pelo modelo não linear

$$A \frac{dh(t)}{dt} = q_i(t) - a\sqrt{2gh(t)} \quad (12)$$

em que A é a seção transversal do tanque superior, a a seção transversal da tubulação de saída da planta q_i a vazão de entrada, g a aceleração da gravidade e h o nível do líquido controlado. Esse modelo foi aproximado por uma função de transferência de primeira ordem, identificada de forma empírica pela resposta ao degrau (Figura 4), para a válvula totalmente aberta e em uma faixa de operação de 2 a 18 [cm].

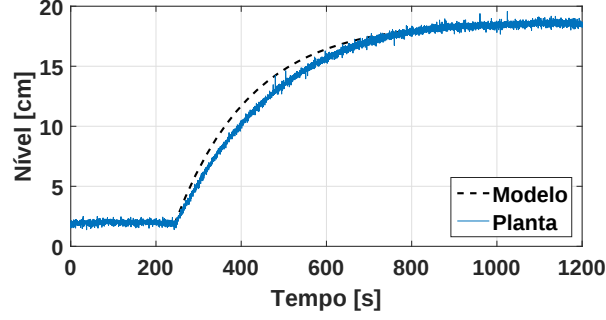


Figura 4: Resposta ao Degrau - Planta de Nível Extó XC220 e Modelo de Primeira Ordem.

A função de transferência que relaciona a tensão aplicada a bomba com a leitura do sensor é

$$G(s) = \frac{1,64}{171,1s + 1} \frac{[V]}{[V]} \quad (13)$$

ou, equivalentemente

$$G(s) = \frac{8,364}{171,1s + 1} \frac{[cm]}{[V]} \quad (14)$$

quando a saída considerada é o nível do reservatório.

4 Implementação e Resultados Práticos

Tendo como proposta a implementação do NCS em uma planta de nível, foi utilizado a expansão do sistema por adição de integrador, fazendo assim com que o sistema seja capaz de rastrear referência. O tipo de integração utilizado foi *Forward-Euler* com função de transferência

$$\frac{I_e(z)}{e(z)} = \frac{Tz^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (15)$$

sendo T o período de amostragem e $e_k = r_k - C\hat{x}_k$ o erro entre o sinal de referência, r_k a saída estimada, resultando no sistema expandido com matrizes

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -TC & I \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

que garante em regime permanente $y_k = r_k$ para entradas do tipo degrau.

A planta (13) foi discretizada com $T = 0,025$ [s] utilizando o retentor de ordem zero (*Zero-Order Hold* - ZOH) e o cálculo do controlador para os ensaios práticos foi realizado considerando $\bar{\nu}_k = 1$, ou seja, não há perdas de pacotes na entrega do sinal de controle. Com a expansão (16), o vetor de ganhos do controlador ótimo calculado por (10) é dado por

$$L_k = [9,30 \quad -0,45] \quad (17)$$

em que o primeiro elemento é o ganho de retroação e o segundo é referente ao ganho do integrador, respectivamente.

O estimador (5)-(9) e controlador (17) foram implementados em ambiente *LabVIEW*, com o auxílio da interface NI ELVIS II, para o controle da planta de nível. A Figura 5 apresenta os resultados práticos para o ensaio realizado com probabilidades de perda de pacote na leitura $(1 - \bar{\gamma})$ de 25%, 50% e 75%.

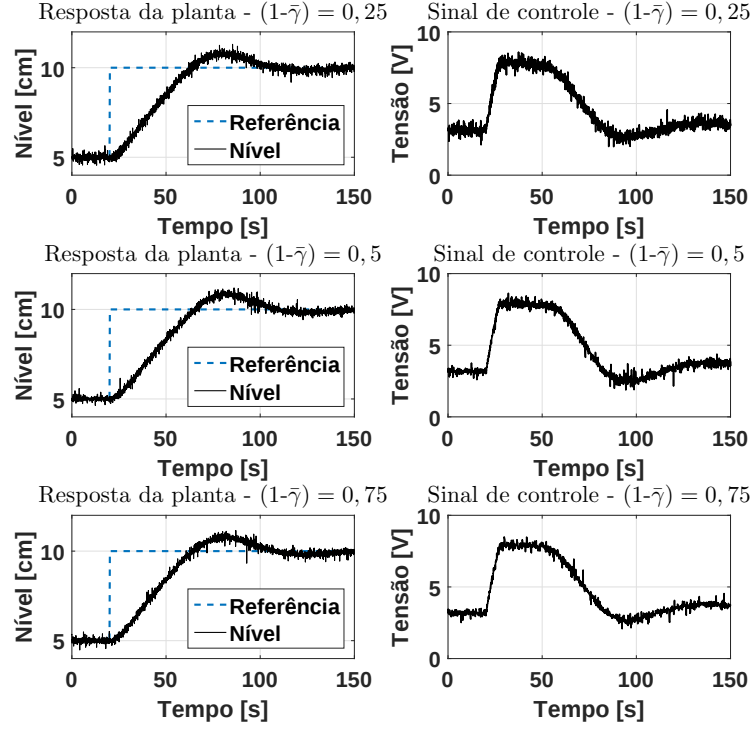


Figura 5: Controle de nível sujeito a perdas de comunicação.

Em cada um dos casos, calculou-se o erro quadrático entre o estado e a estimação, sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Erro entre estado e estimação.

$1 - \bar{\gamma}$	Erro quadrático
0,25	11,1369
0,50	20,7035
0,75	35,0393

Mesmo com a leitura intermitente, provocada pela perda de pacote, e o erro quadrático

aumentando conforme o aumento da probabilidade dessas perdas, o algoritmo foi capaz de atuar corretamente e a planta rastreia a referência especificada em todos os casos.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado uma aplicação prática de um NCS em que há perdas de pacotes nas comunicações entre sensor e controlador com o objetivo de controlar um sistema de nível. Foram obtidos bons resultados, comprovando o funcionamento dos algoritmos apresentados e aplicabilidade da técnica em contextos práticos. Em trabalhos futuros, estuda-se implementar técnicas de controle ótimo em sistemas com atrasos de transmissão em conjunto com as perdas de pacotes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG E CNPq pelo suporte financeiro.

Referências

- [1] J. Hespanha, P. Naghshtabrizi and Y. Xu, Y, A survey of recent results in networked control systems, Proc. of the IEEE – Special Issue on Technology of Networked Control Systems, vol. 95, (2007).
- [2] M. Donkers, L. Hetel, W. Heemels, N. van de Wouw, N. and M. Steinbuch, Stability analysis of networked control systems using a switched linear systems approach, Hybrid Systems: Computation and Control – Lecture Notes in Computer Science, (2009).
- [3] B. Sinopoli, L. Schenato, M. Franceschetti, K. Poolla and S. Sastry, Optimal Control with Unreliable Communication: the TCP Case, American Control Conference, (2005).
- [4] J. Geromel, Sistema de Controle em Rede – Análise, Projeto e Aplicação Prática, XX Congresso Brasileiro de Automática, (2014).
- [5] L. Schenato, B. Sinopoli, M. Franceschetti, K. Poolla and S. Sastry, Foundations of Control and Estimation Over Lossy Networks, Proceedings of the IEEE, vol. 95, (2007).
- [6] L. Schenato, To zero or to hold control inputs with lossy links?, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, (2009).
- [7] L. Carvalho, Manual de operação, instalação e manutenção – Controle de Nível, Vazão e Temperatura – XC222, (2015).