

Análise de Perda de Pacotes em Sistema de Controle em Rede sem Fio com Aplicação de Filtros Kalman

Edson Leonardo dos Santos, Welder Siena, Carlos Alexandre Gouvea da Silva e Eduardo Parente Ribeiro

Resumo—O uso da tecnologia sem fio em redes industriais representa um grande desafio devido aos requisitos esperados de qualidade. Efeitos como atraso e ruídos do ambiente podem afetar o desempenho de uma rede sem fio. A perda de pacotes durante a transmissão de dados é um dos principais defeitos que podem influenciar no funcionamento de uma planta industrial. Neste sentido, a realização de simulações sobre uma planta de controle consiste em um aspecto imprescindível para avaliar a estabilidade do sistema e o comportamento de controladores no processo de atenuação dessas perdas de pacotes. Desse modo, este trabalho apresenta a análise do modelo de perdas de Gilbert-Elliott sobre um sistema de controle em rede sem fio (WNCS, *Wireless Networked Control System*) com a aplicação do filtro de Kalman para a compensação das perdas. Os resultados mostram que os parâmetros calibrados para o modelo apresentam valores aproximados na estimativa para o comportamento de perdas e que também mostrou-se compatível para o cenário de perdas em rajadas com erro menor do que 6%. Adicionalmente, verificou-se que mediante a aplicação do filtro de Kalman foi possível diminuir o erro da saída do sistema em relação à referência na presença de perdas de pacotes.

Palavras-Chave—Modelo de Gilbert-Elliott, Perda de Pacote, Filtro de Kalman, Sistema de Controle em Rede sem Fio.

Abstract—The use of wireless technology in industrial networks has a high challenge due to the expected quality requirements. Effects such as delay and noise can affect the performance of a wireless network. The loss of packets during data transmission is one of the main defects that can influence the operation of an industrial plant. In this sense, the simulations on a control plant consists of an essential aspect to evaluate the stability of the system and the behavior of controllers, in the process of attenuation of these losses of packets. Thus, this work presents the analysis of the Gilbert-Elliott loss model on a Wireless Networked Control System (WNCS) with application the Kalman filter for loss compensation. Results show that the parameters calibrated for the model have approximate values in the estimation for the losses behavior and that also proved to be compatible with the scenario of bursts losses with errors less than 6%. In addition, was verified that by applying to Kalman filter is possible to reduce the error of the output system in relation to the reference in the presence of packet losses.

Keywords—Gilbert-Elliott Model, Packet Loss, Kalman Filter, Wireless Networked Control System.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle em rede sem fio (WNCS, *Wireless Networked Control System*) consistem em uma arquitetura

Edson Leonardo dos Santos e Welder Siena. Faculdade de Tecnologia SENAI. Curitiba-PR. Carlos Alexandre Gouvea da Silva e Eduardo Parente Ribeiro. Programa de Pós de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, UFPR. Curitiba-PR, E-mails: edson.santos@pr.senai.br, welder.siena@pr.senai.br, carlos.gouvea@ufpr.br, edu@eletrica.ufpr.br

de monitoramento e controle espacialmente distribuída, onde sensores, atuadores, controladores e processo são conectados mediante rede de comunicação de dados sem fio, como mostrado na Figura 1 [1] [2]. Nos últimos anos nota-se um crescimento na utilização desta arquitetura em aplicações de carácter industrial, comercial e militar, a qual é proporcionada pelos benefícios atrelados a implementação do WNCS, como: redução de custo, redução da complexidade de cabamentos e facilidade na manutenção [3] [4].

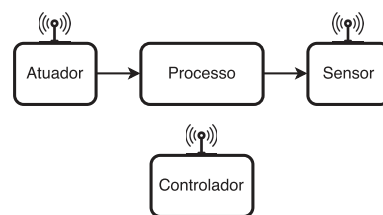


Fig. 1. Sistema de controle em rede sem fio.

Além dos benefícios associados ao WNCS, esta arquitetura de controle caracteriza-se pela sua susceptibilidade a distúrbios e desvanecimento da potência do sinal de transmissão, o que acarreta em uma maior probabilidade de perda de pacotes, as quais podem proporcionar em um WNCS a instabilidade da malha de controle.

A instabilidade das redes de sensores sem fio faz crescer os desafios relativos à obtenção de sistemas de controle mais estáveis [5]. Por isso, há a necessidade da utilização de modelos acurados dos canais de transmissão para a análise de controladores no processo de mitigação dos efeitos ocasionados pelas falhas na transmissão de pacotes [4].

O modelo para perda de pacotes de Gilbert-Elliott foi utilizado neste trabalho, pois verificou-se uma melhor representação para diferentes razões de perdas em função da distância entre os dispositivos nós da rede sem fio quando comparado com o modelo de Bernoulli.

Pode-se destacar duas contribuições neste trabalho: i) a análise de desempenho do modelo Gilbert-Elliott para modelagem de pacotes a partir de uma planta de controle real, onde foram obtidos os parâmetros de calibração do modelo em função da razão de perdas para a avaliação do WNCS; ii) bem como a aplicação do filtro de Kalman para obter a redução do erro associado ao comportamento de funcionamento da planta quando ocorre a falha durante a transmissão em decorrência da perda de pacotes. O comparativo entre comportamento sem compensação e com compensação foi efetuado mediante duas

métricas, sendo estas: o RMSE (*Root Mean Square Error*) e o R^2 que avaliam o desempenho do sistema realimentado.

Este trabalho está dividido da seguinte maneira. Além desta seção introdutória, a seção II apresenta as principais causas de perdas de pacotes em redes sem fio e trabalhos relacionados a modelos de perdas. Na seção III é descrito o cenário utilizado para a obtenção das perdas de pacotes. Na seção IV são apresentados os resultados obtidos e por fim em V as conclusões finais.

II. PERDAS DE PACOTES

Uma perda de pacote pode ser entendida como um pacote que é enviado na rede e não é recebida corretamente no receptor. Durante a transmissão essa perda pode ocorrer por várias razões nas camadas física (PHY, *physical*) ou de enlace (MAC, *media access control*) [6]. Determinar as causas de perda de pacotes é importante, pois permite uma melhor descrição e estimação do modelo que representa este comportamento. A perda de pacotes em uma rede sem fio pode ser dividido em três categorias: perdas podem ser resultado da baixa potência do sinal recebido (RSS, *low signal strength*); perdas podem ser resultado de colisões causadas por vários transmissores que utilizam o mesmo canal de transmissão; e perdas ocorrem a partir de colisões por transmissões assíncronas causadas por terminais ocultos (*hidden terminals*) [7].

Observa-se que outros parâmetros também são importantes para o entendimento dessas perdas como: baixos níveis de potência do sinal, obstáculos físicos que causam o desvanecimento do sinal (*fading*), ruídos, competição no canal que causam colisões ou perdas em *buffers* de memórias nos transmissores, pontos de acesso e receptores [8].

Em WNCS, o impacto da perda de pacotes nessas redes é ainda maior [9] [10]. Em redes IEEE 802.15.4 é necessário a aplicação de técnicas para a compensação das perdas a fim de mitigar o impacto nos sistemas controlados [11]. Em redes IEEE 802.11 a perda de pacotes, assim como outros parâmetros, como, capacidade de *throughput* e RTT (*round trip time*), são analisados como índices importantes no desempenho de redes NCS [12].

Já a utilização do filtro de Kalman nos sistemas de controle, permite um melhor dimensionamento e controle dos sistemas NCS com ocorrência de perda de pacotes [13].

Cadeias marcovianas representam os principais modelos de perda de pacotes em redes sem fio. Isso porque, modelos de cadeias de Markov facilitam uma melhor descrição de seqüências de perdas estocásticas. Em WNCS esse fator não é diferente. Em Hua, Zheng e Guan [14] foi proposto um modelo simples de perda de pacotes para WNCS em IEEE 802.11b, a partir de uma cadeia de Markov de 4 estados que considera 1 para pacote recebido ou 0 para pacote perdido. A aplicação desse modelo permitiu o uso de métodos seguros de perdas em simulações e testes.

Qu et al. [4] utilizam um modelo de perdas baseado no modelo de Bernoulli de dois estados em WNCS. Este modelo de perdas no canal descreve a transmissão entre a entrega ou não dos pacotes em uma comunicação fechada. Em Li et al. [15] descrevem a utilização de um design tolerante a falhas em

WNCS. A perda de pacotes é modelada utilizando uma função α que assume que a perda de pacotes em WNCS ocorre como um processo de probabilidade.

Uma técnica de controle discreta é proposta por Zhang, Bae e Tomizuka [16], onde foi utilizado o modelo de perda de pacotes também Bernoulli. O uso do filtro de Kalman foi modificado para incluir o modelo de perda de pacotes em WNCS.

Contudo, observa-se a falta da aplicação do modelo de Gilbert-Elliott para a análise das perdas de pacotes em WNCS com a utilização do protocolo IEEE 802.15.4 e com a compensação de filtro Kalman. Assim, procuramos fazer uma avaliação dessa utilização.

III. METODOLOGIA

A Figura 2 apresenta o cenário utilizado para coletar os dados de transmissão entre dois nós XBee Série 1 montados e configurados através da topologia *end-to-end*. Baseado no protocolo de comunicação IEEE 802.15.4, a medição dos pacotes transmitidos foi executada mediante dispositivo de captação de dados The SmartRF™ Packet Sniffer da Texas Instruments. O sistema WNCS proposto consiste em uma planta de controle com o objetivo de controlar o sentido de rotação e a velocidade de um motor de corrente contínua. O nó 1 foi parametrizado como controlador e é responsável pelo cálculo matemático dos dados da planta, ou seja, manter o funcionamento do processo em torno de um valor específico (*setpoint*). O nó 2 foi parametrizado como sensor e é responsável pelo acionamento do motor (Tensão: 12 Vcc, Torque: 198 gf.cm) e leitura do sinal do *encoder* (Tensão: 5 Vcc, Resolução: 360 pulsos por volta). Dois módulos Arduino® UNO foram acoplados aos nós para realizar o tratamento dos sinais da rede sem fio. A Figura 3 mostra a planta de teste em funcionamento com *setpoint* de 2400 RPM (rotações por minuto).

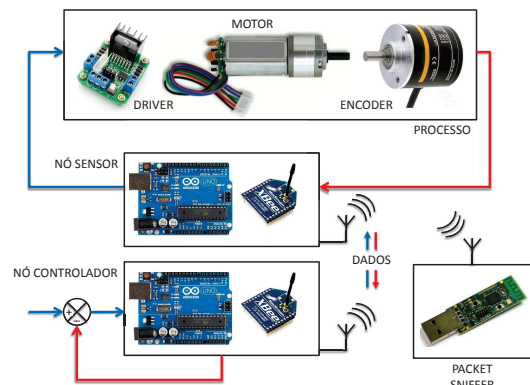


Fig. 2. Cenário para realização dos ensaios, em azul o sinal de controle e em vermelho a realimentação da planta.

O dispositivo Packet Sniffer foi utilizado para capturar as informações comportamentais reais de transmissão de dados entre os nós da rede. Os dados analisados consistem em um vetor de 0s e 1s, onde (0 = pacote perdido, 1 = pacote transmitido e recebido com sucesso). Através do cenário proposto, os nós foram submetidos a variações métricas em ambiente *indoor* com a presença de máquinas industriais em funcionamento, como Torno Mecânico, Fresa Mecânica e Robôs

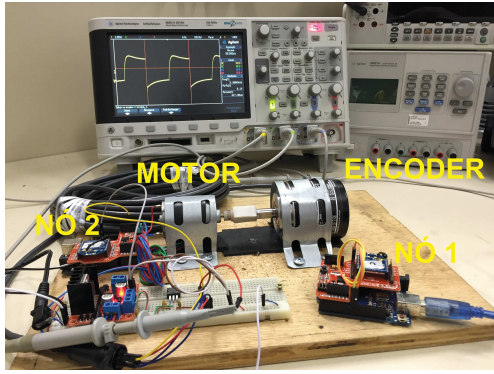


Fig. 3. Planta de teste.

industriais para a avaliação do número de pacotes perdidos. Tais variações consistiram em distâncias, que apresentaram uma distribuição aproximada de perdas conforme a Tabela I. Na análise em questão os pacotes foram transmitidos sobre intervalos constantes de 350 ms (tempo mínimo que permite o correto funcionamento da planta). O número total de pacotes enviados para cada distância foi de 10000 pacotes, sendo realizadas 10 repetições para cada transmissão.

TABELA I
PERDA DE PACOTES PARA CADA DISTÂNCIA

Distância (m)	Razão de Perdas (%)
1	10
3	20
7	30
9	40
13	50

Com base nas informações de transmissão obtidas pelo Packet Sniffer e após obter o reconhecimento dos pacotes que formaram o *trace* real de perdas, foi efetuada a calibração do modelo de Gilbert-Elliott [17] [18]. O modelo de perdas proposto por Gilbert-Elliott utiliza uma cadeia de Markov de dois estados como mostrado na Figura 4.

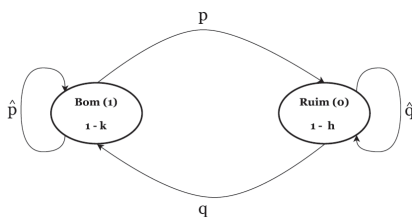


Fig. 4. Modelo de Gilbert-Elliott de dois estados.

Esses estados são denominados Bom (1) e Ruim (0), com probabilidade de ocorrência de erro de $1 - k$ para o estado Bom e $1 - h$ para o estado Ruim [17] [19]. Nesta série o estado atual X_t de um processo estocástico depende apenas do valor prévio, X_{t-1} . Os parâmetros p e q são responsáveis pela determinação da probabilidade de transição entre os estados da série temporal X_t . A Equação 1 apresenta o parâmetro p como sendo a probabilidade de troca do estado Bom para o Ruim, enquanto que a Equação 2 apresenta o parâmetro q como sendo a probabilidade de troca do estado Ruim para Bom.

$$p = P(X_t = 0 \mid X_{t-1} = 1) \quad (1)$$

$$q = P(X_t = 1 \mid X_{t-1} = 0) \quad (2)$$

A probabilidade de estado estacionário para o estado Bom e estado Ruim pode ser calculada através das Equações $\hat{p} = \frac{q}{p+q}$ e $\hat{q} = \frac{p}{p+q}$, respectivamente, e a taxa de erro do modelo é apresentada na Equação 3.

$$\text{erro} = (1 - k)\hat{p} + (1 - h)\hat{q} \quad (3)$$

O modelo de Gilbert-Elliott foi aplicado para cada razão de perdas (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) para obter o comportamento simulado das perdas em rajadas. Os parâmetros estimados para \hat{p} e \hat{q} em função da razão de perdas são apresentados na Tabela II. Observa-se uma aproximação desses parâmetros com o trabalho realizado em [20]. Os valores de \hat{p} e \hat{q} podem ser usados para determinar o desempenho de um WNCS sob condições de perda de pacotes.

TABELA II
VALORES MÉDIOS CALIBRADOS PARA \hat{p} E \hat{q}

Razão de perdas (%)	Parâmetro [Este trabalho]		Parâmetro [20]	
	\hat{p}	\hat{q}	\hat{p}	\hat{q}
10%	0,79	0,08	0,78	0,09
20%	0,55	0,14	0,55	0,13
30%	0,40	0,17	0,40	0,17
40%	0,37	0,23	0,36	0,23
50%	0,36	0,37	0,36	0,38

Para efetuar a análise dos dados de transmissão, foi desenvolvido um algoritmo via plataforma MATLAB. Na implementação do algoritmo, um valor de saída da planta em cada período de amostragem é comparado com o vetor de dados transmitidos a partir do nó sensor para o nó controlador. Caso um pacote tenha sido perdido durante a transmissão, o sistema irá tomar uma ação para tentar evitar uma falha no funcionamento do processo.

O algoritmo utilizado para mitigar o efeito das perdas de pacotes foi montado através do filtro de Kalman, que utiliza uma série de medições observadas ao longo do tempo para estimar valores possíveis para um determinado sistema. Observa-se que quando não há perda do pacote, o último valor de saída da planta irá realimentar a malha. No entanto, quando há perda do pacote, o valor que irá realimentar a malha será dado através da previsão obtida pelo filtro de Kalman. Já a atualização dos valores de previsão acontece mediante observação do sinal de saída da planta.

As Equações 4, 5 e 6 foram utilizadas para estimar valores a partir do comportamento de funcionamento da planta. Onde \hat{x}_k é o valor estimado para o estado atual, baseado no valor do estado anterior \hat{x}_{k-1} , no valor de observação atual z_k (sinal de saída da planta) e no valor do ganho atual g_k . O valor do ganho de Kalman é baseado no valor médio do ruído de observação r , e no valor do erro de previsão p_k . Já o erro de previsão por sua vez é computado recursivamente.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + g_k(z_k - \hat{x}_{k-1}) \quad (4)$$

$$g_k = p_{k-1} / (p_{k-1} + r) \quad (5)$$

$$p_k = (1 - g_k)p_{k-1} \quad (6)$$

Mediante aplicação do modelo de Gilbert-Elliott, foi determinado o comportamento simulado das perdas e após a definição do algoritmo para mitigar o efeito das perdas, o sistema de controle contínuo da planta foi convertido para o sistema discreto através da plataforma MATLAB para avaliação do WNCS digital.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para comparar o modelo de Gilbert-Elliott com os dados de transmissão extraídos a partir do comportamento real da perda de pacotes e aplicar o filtro de Kalman no sistema, foi utilizada uma planta de segunda ordem com controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) desenvolvido via Simulink. A análise foi realizada em um WNCS, cujo objetivo é controlar o sentido de rotação e a velocidade de um motor. A Figura 5 apresenta a malha de controle da planta.

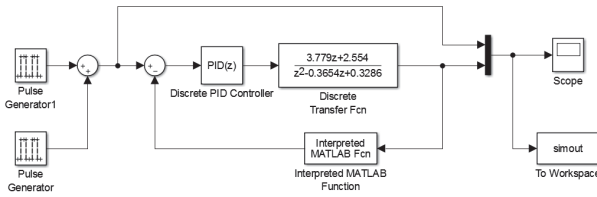


Fig. 5. Planta utilizada na simulação do WNCS com período de amostragem de 350 ms.

A função de transferência da malha de controle fechada foi obtida através de um sinal Degrau e as características do sistema foram obtidas, tais como, sobressinal, tempo de pico e tempo de amortização. Os ganhos do controlador PID do processo foram calculados mediante LGR (Lugar Geométrico das Raízes), para o cálculo foi utilizado um sobressinal de 20% e tempo de estabilização de 2,1 s.

Duas métricas foram utilizadas na análise de desempenho do sistema, sendo a primeira o *Root Mean Square Error* (RMSE) dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - r_i)^2} \quad (7)$$

onde N é o número de amostras, y_i consiste no valor observado e r_i representa os valores modelados. O RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados.

Outra métrica utilizada na análise de desempenho do sistema foi o coeficiente de determinação R^2 dado por:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

onde SSE consiste o somatório do erro quadrático, SST consiste no somatório quadrático total, n é o número de

observações da série e p é o número do coeficiente de regressão.

A primeira análise realizada é apresentada na Figura 6, sendo verificada a aplicação do modelo de Gilbert-Elliott em relação ao comportamento apresentado pela planta em caso real de perdas. Observa-se que o modelo de Gilbert-Elliott apresenta um $RMSE_G$ próximo ao caso real de perdas $RMSE_P$. Na análise em questão foram executadas 10 medições com 10000 pacotes, onde foi calculado o desvio padrão para cada medição e plotado o RMSE médio com um intervalo de confiança de 95%.

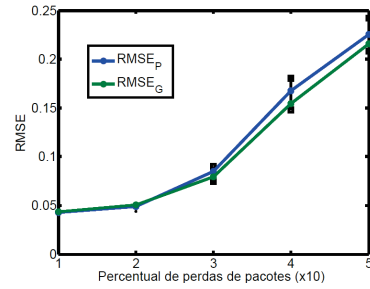


Fig. 6. RMSE em função da razão de perdas.

A seguir são mostrados os resultados das análises de funcionamento do processo controlado. Para o processo em funcionamento sem perdas o RMSE calculado é 0,9942 e o R^2 é 0,8361. A Figura 7 mostra o comportamento do sinal de saída do WNCS para uma taxa de perda de pacotes de 30%, onde a caracterização das perdas se deu através da aplicação do modelo de Gilbert-Elliott. Nesta análise, o RMSE do sistema é 1,6192 e o R^2 é 0,6818. Nota-se que quando comparado o RMSE, o comportamento referente ao funcionamento do controlador está 38,6% pior em relação ao comportamento sem perdas.

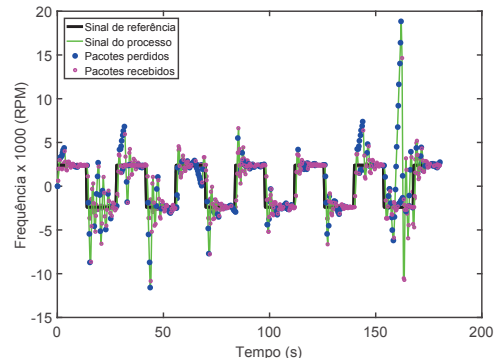


Fig. 7. Funcionando do processo com 30% de perdas de pacotes.

Para estimar valores que irão realimentar a planta em caso de perdas, o processo foi submetido à análise do vetor de dados, conforme descrito na sessão anterior. A Figura 8 mostra o funcionamento do processo com a aplicação do filtro de Kalman, nota-se que mesmo havendo pacotes perdidos durante a transmissão é possível manter o processo em funcionamento de forma mais próxima o comportamento real do sistema. Nesta análise, o RMSE do sistema foi de 1,1364 e o R^2 é 0,7882.

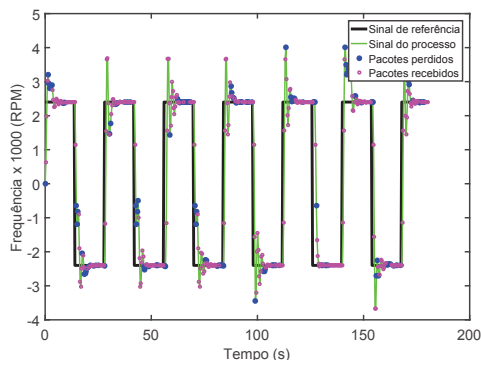


Fig. 8. Funcionando do processo recuperado após a análise dos pacotes perdidos.

A Tabela III apresenta os resultados da análise dos erros de transmissão em relação ao percentual de perdas. Observa-se que quanto maior é a razão das perdas, maior é o erro associado ao comportamento de funcionamento da planta. No entanto, foi possível obter uma redução significativa deste erro com a introdução do filtro de Kalman.

TABELA III

ERROS DO PROCESSO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE PERDA DE PACOTES

Métrica	Razão de perdas			
	0%	10%	20%	30%
RMSE (sem Kalman)	0,9942	1,0228	1,3524	1,6192
RMSE (com Kalman)		1,0091	1,1978	1,1364
R^2 (sem Kalman)	0,8361	0,8287	0,7483	0,6818
R^2 (com Kalman)		0,8303	0,7635	0,7882

V. CONCLUSÕES

A modelagem correta de perda de pacotes em uma rede sem fio é bastante importante para ambientes simulados. Neste trabalho, o modelo de perdas proposto por Gilbert-Elliott foi aplicado em um trace real de perdas. A medição dos dados de transmissão aconteceu sobre o protocolo IEEE 802.15.4 e o modelo proposto mostrou-se bastante acurado para o cenário de perdas em rajadas, apresentando um percentual de erro menor do que 6%. Ainda verificou-se que os parâmetros calibrados \hat{p} e \hat{q} , conforme a Tabela II apresentam valores aproximados na estimativa do comportamento das perdas. Assim, verifica-se a possibilidade de utilizar simulações em WNCS com o uso desses valores, sem que haja à necessidade de novas aquisições de dados de transmissão.

Uma das técnicas para mitigar o efeito das perdas decorrentes de uma transmissão de dados é a aplicação de filtros. Neste trabalho, o filtro de Kalman foi aplicado a fim de minimizar o impacto no funcionamento de um sistema de controle em rede sem fio WNCS mediante a análise dos pacotes perdidos. Conhecendo o comportamento real da planta, observou-se através da simulação do sistema que é possível diminuir o erro da saída do sistema em relação à referência na presença de perda de pacotes. Para uma razão de perdas de 30%, a

melhora observada no comportamento do sistema com o uso do filtro de Kalman foi de 26,1%.

REFERÊNCIAS

- [1] M. S. Mahmoud, "Wireless Networked Control System Design: An Overview," in *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on*. IEEE, 2014, pp. 2335–2340.
- [2] A. Ulusoy, O. Gurbuz, and A. Onat, "Wireless Model-based Predictive Networked Control System over Cooperative Wireless Network," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 1, pp. 41–51, 2011.
- [3] Y. A. Millan, F. Vargas, F. Molano, and E. Mojica, "A Wireless Networked Control Systems Review," in *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*. IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [4] F. L. Qu, Z. H. Guan, T. Li, and F. S. Yuan, "Stabilisation of Wireless Networked Control Systems with Packet Loss," *IET Control Theory Applications*, vol. 6, no. 15, pp. 2362–2366, October 2012.
- [5] C. A. G. da Silva, E. L. dos Santos, A. C. K. Ferrari, and H. T. dos Santos Filho, "A Study of the Mesh Topology in a ZigBee Network for Home Automation Applications," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 935–942, May 2017.
- [6] J.-C. Bolot, "End-to-end Packet Delay and Loss Behavior in the Internet," in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 23, no. 4. ACM, 1993, pp. 289–298.
- [7] L. Qiu, Y. Zhang, F. Wang, M. K. Han, and R. Mahajan, "A General Model of Wireless Interference," in *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2007, pp. 171–182.
- [8] M. Abusubaih, "Approach for Discriminating Losses in 802.11 Wireless LANs," *IET communications*, vol. 6, no. 10, pp. 1262–1269, 2012.
- [9] N. V. A. Quang and M. Yoo, "Performance Analysis of Packet Loss on Wireless Network Control Systems," in *2014 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, October 2014, pp. 185–186.
- [10] G. Boggia, P. Camarda, V. Divittorio, and L. A. Grieco, "A Simulation-based Performance Evaluation of Wireless Networked Control Systems," in *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation*, September 2009, pp. 1–6.
- [11] R. H. Choi, S. C. Lee, D. H. Lee, and J. Yoo, "WiP Abstract: Packet Loss Compensation for Cyber-Physical Control Systems," in *2012 IEEE/ACM Third International Conference on Cyber-Physical Systems*, April 2012, pp. 205–205.
- [12] G. Tian, Y. C. Tian, and C. Fidge, "Performance Analysis of IEEE 802.11 DCF based WNCS Networks," in *IEEE Local Computer Network Conference*, October 2010, pp. 496–503.
- [13] L. Schenato, "Optimal Estimation in Networked Control Systems Subject to Random Delay and Packet Drop," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 5, pp. 1311–1317, June 2008.
- [14] C.-C. Hua, Y. Zheng, and X.-P. Guan, "Modeling and Control for Wireless Networked Control System," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 8, no. 3, pp. 357–363, 2011.
- [15] W. Li, Z. Wang, G. Zhou, and Z. Zhu, "Design of Fault Tolerant Wireless Networked Control Systems," in *2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, May 2011, pp. 65–68.
- [16] W. Zhang, J. Bae, and M. Tomizuka, "Modified Preview Control for a Wireless Tracking Control System With Packet Loss," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 299–307, February 2015.
- [17] G. Hasslinger and O. Hohlfeld, "The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet," in *14th GI/ITG Conference - Measurement, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems*, March 2008, pp. 1–15.
- [18] Y. Qi, P. Cheng, and J. Chen, "Dynamic Sensor Data Scheduling for Remote Estimation over Gilbert-Elliott Channel," in *2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, October 2014, pp. 26–30.
- [19] K. V. Cardoso and J. F. de Rezende, "Análise e modelagem de perda de pacotes em redes 802.11 em ambientes indoor," *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2007.
- [20] W. Siena, G. V. Leandro, and E. P. Ribeiro, "Comparação entre Modelos de Perdas de Pacotes sobre um WNCS com Protocolo IEEE 802.15.4," in *XXI Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. Vitória/ES-Brasil, 2016.