

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE PERDAS DE PACOTES SOBRE UM WNCS COM PROTOCOLO IEEE 802.15.4

WELDER SIENA*, GIDEON VILLAR LEANDRO[†], EDUARDO PARENTE RIBEIRO[‡]

**Universidade Federal do Paraná - Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos
Jardim das Américas
Curitiba, Paraná, Brasil*

Emails: weldersiena@gmail.com, gideonvillar@gmail.com, edu@eletrica.ufpr.br

Abstract— Understanding the intrinsic dynamics in a wireless control system (WNCS - Wireless Networked Control System) is relevant to the development and analysis of control strategies that provide system's operation under adverse conditions. In this sense, the packet loss is one of the major deficiencies in present wireless data transmission, resulting in the need for accurate packet loss models, to be performed with reliability the design and simulation of a WNCS. This study analyzed the behavior of a plant in different packet loss levels using the IEEE 802.15.4 protocol. The analyzes were made on two packet loss models, in order to verify the model presents accuracy in the performance of representation of packet loss in a WNCS. The results show under what conditions the models of Bernoulli and the Gilbert-Elliott differ in packet loss representation in a WNCS operating with protocol IEEE 802.15.4. In the analyzed environment, the model of Gilbert-Elliott showed a better representation of the influence of losses on the WNCS, especially for higher loss rates.

Keywords— WNCS, packet loss, Gilbert-Elliott model, Bernoulli model.

Resumo— A compreensão da dinâmica intrínseca em um sistema de controle de rede sem fios (WNCS - Wireless Networked Control System) é relevante para o desenvolvimento e análise de estratégias de controle que proporcionem o funcionamento do sistema em condições adversas. Neste sentido, a perda de pacotes é uma das principais deficiências presentes na transmissão de dados sem fios, o que acarreta na necessidade de modelos de perda de pacotes acurados, para que seja executado com confiabilidade o projeto e a simulação de um WNCS. Neste sentido o presente trabalho analisou o comportamento de uma planta, em diferentes níveis de perda de pacotes utilizando o protocolo IEEE 802.15.4. Foram comparados dois modelos de perda de pacotes, a fim de verificar qual o modelo apresenta acurácia na representatividade do comportamento das perdas de pacotes em um WNCS operando com protocolo IEEE 802.15.4. Os resultados demonstram em que condições os modelos de Bernoulli e Gilbert-Elliott diferem na representação de perda de pacotes em um WNCS. No ambiente analisado, o modelo de Gilbert-Elliott mostrou ter uma melhor representação da influência das perdas sobre o WNCS, especialmente para taxas de perdas mais elevadas.

Palavras-chave— WNCS, perda de pacote, modelo de Gilbert-Elliott, modelo de Bernoulli.

1 Introdução

O sistema de controle em rede (NCS - Networked Control System) consistem em arquiteturas de controle espacialmente distribuídas, em que a comunicação entre os sensores, atuadores e controladores é efetuada mediante rede digital compartilhada (Tian et al., 2010). Este sistemas têm atraído muita atenção nos últimos anos decorrente do potencial de aplicação e dos benefícios proporcionados pela inserção desta arquitetura nos sistemas automatizados de controle em tempo real. Alguns dos benefícios comumente associados a inserção da arquitetura de controle em rede são: redução de custo, redução da complexidade de cabeamentos e facilidade na manutenção (Millan et al., 2011).

Além dos sistemas de controle em rede que operam mediante protocolos que utilizam de cabeamento para a disseminação de dados de monitoramento, hoje em dia observa-se uma expansão na utilização de sistemas wireless em aplicações de monitoramento e controle, onde são utilizados protocolos, como: IEEE 802.11 / WLAN, 802.15.1/WPAN, IEEE 802.15.4/ZigBee, ISA100.11a e WirelessHART. Dentre estes

protocolos, o IEEE 802.15.4 apresenta um emergente crescimento no que diz respeito ao monitoramento e controle industrial. Este aspecto se deve as suas características, como: a baixa complexidade na configuração dos nós, baixo custo de aquisição/implementação e baixo consumo do dispositivo. Estes são fatores que impulsionam a aplicação desta tecnologia caracterizando-os como: WNCS (Wireless Networked Control System) (Ulusoy et al., 2011);(Afifi et al., 2015).

Contudo, à medida que as redes de sensores sem fio e os sistemas de controle em rede se difundem, crescem os desafios relativos à obtenção de sistemas de controle mais confiáveis e eficientes. Entretanto para o desenvolvimento de sistemas mais confiáveis os WNCS necessitam de uma abordagem multidisciplinar, como: tecnologias de redes de comunicação, processamento de sinais e teoria de controle de sistemas dinâmicos, para que assim se possa controlar remotamente e com confiabilidade um sistema dinâmico (Godoy and Porto, 2013);(Gupta and Chow, 2010).

Devido a esta abordagem multidisciplinar, a simulação de sistemas de controle em rede desempenham um importante papel nos estágios de desenvolvimento e análise do desempenho dos con-

troladores, pois existem fatores que proporcionam a instabilidade do sistema, como exemplo: atrasos, amostragem do sinal, parâmetros de configuração, *jitter*, largura de banda e perda de informação (packet loss) (Song and Zhou, 2013); (Gupta and Chow, 2010); (Godoy and Porto, 2013).

Desse modo, é de fundamental importância e um pré-requisito a utilização de modelos acurados dos canais de transmissão para uma correta simulação e análise dos efeitos associados sobre um sistema de controle operando mediante protocolos sem fio. No entanto, é comum que os sistemas de RSSF (Redes de Sensores Sem Fio) e sistemas WNCS sejam simulados por modelos que não apresentem as características reais dos canais de comunicação, pois normalmente os modelos utilizados na simulação ignoram o comportamento das reais perdas de quadros em determinados ambientes e a influência destas sobre o sistema de controle (Iqbal and Khayam, 2012); (Tian et al., 2010); (Shu et al., 2007). Isto impacta diretamente na qualidade da simulação do sistema (Iqbal and Khayam, 2012).

No entanto, para se modelar o comportamento de um NCS/WNCS há necessidade de se conhecer a dinâmica das perdas de dados e dos atrasos provenientes do protocolo utilizado (Haßlinger and Hohlfeld, 2008). Esta análise proporciona a construção de modelos acurados para o desenvolvimento da simulação, possibilitando assim uma melhor avaliação da performance das técnicas de controle sobre o WNCS.

Neste sentido o presente trabalho buscou a análise de modelos de perdas de dados para o protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee sobre um WNCS. Os modelos foram implementados em uma ferramenta de simulação desenvolvida sobre a plataforma MATLAB, este ambiente foi utilizado para identificar o modelo de perdas de pacotes de maior acurácia com o comportamento real do WNCS sobre a influência de perdas de pacotes. O comportamento das perdas neste trabalho foi modelado como um estado de tempo discreto da Cadeia de Markov 2^k , onde $k = 0$ corresponde ao modelo de Bernoulli, e $k = 1$ corresponde a uma cadeia de Markov de 2 estados denominado modelo de perdas de Gilbert-Elliot.

2 Trabalhos relacionados

Esta seção descreve as investigações anteriores relacionadas à perda de pacotes no NCS, onde verificou-se que muitos trabalhos utilizam o modelo Bernoulli para simulações. Ulusoy (2011) apresenta um sistema de controle preditivo implementado e simulado em um protocolo IEEE 802.15.4. A ferramenta de simulação utilizada no estudo foi TrueTime que utiliza uma distribuição aleatória de perdas sobre uma série $(X_i)_{i=1}^n$. Este fato acarreta em uma simulação para casos gené-

ricos, ou seja, casos onde o enlace de comunicação do WNCS/NCS não apresenta interferências para transmissão, mas sim aleatoriedade nas perdas de pacote em um WNCS que pode levar a um erro que não representa um caso real do comportamento do WNCS com perdas em rajadas.

Em Iqbal (2012) são executadas análises de dependências temporais de perdas de pacotes através da cadeia de Markov de 2ª ordem. Nesta análise é apresentada uma precisão significativa da cadeia de Markov na avaliação de comportamentos reais de perdas de dados pelos protocolos. O estudo realizado levou em consideração BERs (Bit Error Rate) e FERs (Frame Error Rate) e sobre estas características foi efetuada a comparação entre comportamento real e modelos sintéticos de perdas de pacotes, mostrando assim a acurácia da cadeia de Markov de 2ª ordem na representação das perdas, no entanto no trabalho não foi efetuada a comparação das perdas sintéticas e perdas reais sobre um NCS/WNCS.

Shu(2007) efetua uma análise com a cadeia de Markov não estacionária para modelagem de perdas, que é realizada sobre o protocolo IEEE 802.15.4 numa rede de sensor sem fio sem confirmação (NACK). Nesta análise os comportamentos das perdas são modelados em um cenário com vários nós competindo.

Hasslinger (2008) analisa modelos realísticos que representem as falhas e as deficiências inerentes durante a transmissão de dados via rede. Neste caso a cadeia de Markov é aplicada sobre o sistema TCP (Transmission Control Protocol) com tráfego controlado para averiguar a verossimilhança deste modelo com casos reais. Nesta análise os traces foram obtidos a partir de um enlace de comunicação com velocidade de 2,5 Gb/s.

Em outros estudos de NCS/WNCS, Chung (2015) efetua análises dos modelos da cadeia de Markov sobre um processo que operada via protocolo wirelessHart. Nesta análise são avaliados os modelos de Bernoulli e modelos da cadeia de Markov de ordem superior quanto a representação do comportamento do sistema, entretanto no trabalho em questão não foi modelado nem avaliado o comportamento do sistema perante protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee.

3 Metodologia

A medição da perdas foi executada mediante topologia do tipo *end-to-end* entre dois nós xbees (XBee-PRO and Modules, 2013). O Nó 1 foi parametrizado como nó controlador e o nó 2 foi parametrizado como nó sensor. Sobre esta topologia foi inserido um nó de captação de dados (Packet Sniffer) com dispositivo SmartRF da Texas Instruments (Instruments, 2010). Este dispositivo foi utilizado para analisar a quantidade de pacotes perdidos durante a transmissão e também

para analisar o número de retransmissões efetuadas pelo nó sensor. A FIGURA 1 expõe o cenário utilizado para coletar as informações comportamentais de transmissão do protocolo.

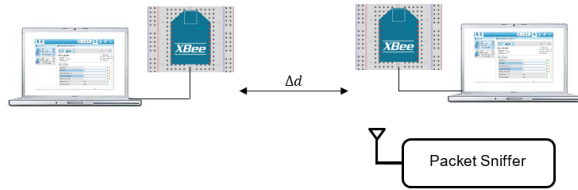


Figura 1: Cenário para realização dos ensaios.

Mediante configuração e cenário montado, os nós foram submetidos a variações métricas em ambiente *indoor* para a avaliação do número de pacotes perdidos. Tais variações consistiram em distâncias, que apresentavam uma distribuição aproximada de perdas conforme Tabela 1:

Tabela 1: Perda de pacote aproximada para cada distância

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

Após esta alocação e montagem da rede entre os nós foi realizada a comunicação. Na análise em questão os pacotes foram enviados sobre intervalos constantes de 100ms para cada transmissão de pacote, onde o total de pacote para cada percentual de perda foi de 10 mil pacotes, sendo realizado 20 repetições para cada transmissão.

A FIGURA 2 mostra um exemplo da transmissão analisada mediante *packet sniffer*, onde o primeiro pacote contém os dados enviados pelo nó sensor. Nestes dados nota-se que o FCF (*Frame Control Field*) possui a requisição de um ACK e o *Sequence Number* do pacote possui o valor de 0x65(hexadecimal). O segundo pacote consiste em um ACK do pacote anterior, pois este pacote possui o mesmo *Sequence Number* e um valor zero no FCF. A análise em questão mostra que o pacote 0x65 foi recebido com sucesso pelo nó controlador. A terceira e quarta linha da análise mostram o pacote 0x66(hexadecimal) e na quinta linha o seu ACK, este fato significa que houve uma retransmissão no envio, mas o pacote foi entregue com sucesso.

Com base nos dados transmitidos foi desenvolvido via plataforma Matlab um programa para efetuar a leitura dos dados e obtenção do *trace* do comportamento real, o qual consiste em um vetor de 0s e 1s (0 pacote perdido, 1 pacote recebido).

PnRx	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
1	+0	23	Type: DATA 0 0 1	0x65	0x3332	0x0000	0x0000	65 00 00 00 00 00 00 00	42	OK
2	+1120	5	Type: ACK 0 0 0	0x65	0x3332	0x0000	0x0000		233	OK
3	+105664	23	Type: DATA 0 0 1	0x66	0x3332	0x0000	0x0000	66 00 00 00 00 00 00 00	42	OK
4	+106784	23	Type: DATA 0 0 1	0x66	0x3332	0x0000	0x0000	66 00 00 00 00 00 00 00	42	OK
5	+109281	23	Type: DATA 0 0 1	0x66	0x3332	0x0000	0x0000	66 00 00 00 00 00 00 00	42	OK
6	+110401	5	Type: ACK 0 0 0	0x66	0x3332	0x0000	0x0000		233	OK
7	+105992	23	Type: DATA 0 0 1	0x67	0x3332	0x0000	0x0000	67 00 00 00 00 00 00 00	42	ERR
8	+109993	23	Type: DATA 0 0 1	0x67	0x3332	0x0000	0x0000	67 00 00 00 00 00 00 00	42	ERR
9	+115999	23	Type: DATA 0 0 1	0x67	0x3332	0x0000	0x0000	67 00 00 00 00 00 00 00	42	ERR

Figura 2: Análise dos dados pelo *PACKET SNIF-FER*.

Após transferência de dados pelo protocolo IEEE 802.15.4 e reconhecimento dos pacotes recebidos e pacotes perdidos que formaram o *trace* real de perdas, foi efetuada a calibração dos modelos de perdas de Bernoulli e Gilbert-Elliot.

O modelo de perdas de Bernoulli, como característica apresenta uma sequência aleatória das perdas do tipo IID (Independente e Identicamente Distribuída), isto é, a probabilidade da série dos dados X_i ser 0 ou 1 independe de outros valores da série temporal e a probabilidade é independente de i . Este modelo caracteriza-se por um simples parâmetro, r . A estimativa deste parâmetro, $\hat{r}$ é fornecida por:

$$\hat{r} = n_0/n \quad (1)$$

onde n_0 consiste na quantidade do número de vezes que 0 (pacote perdidos) ocorre na série $(x_i)_{i=1}^n$ e n consiste no número de amostras da série temporal. Desse modo o parâmetro r consiste na taxa de perda média (Yajnik et al., 1999);(Chung et al., 2015).

O modelo de Gilbert-Elliot para perdas de dados consiste em uma classe especial de modelos da cadeia de Markov, onde sua representação é efetuada por uma cadeia de dois estados que utiliza de uma sequência binária, a qual é dividida de acordo com a ordem das transições da série (Iqbal and Khayam, 2012);(Haßlinger and Hohlfeld, 2008). Nesta série o estado atual X_i de um processo estocástico depende apenas do valor prévio, X_{i-1} .

O modelo de Gilbert-Elliot leva em conta a dependência das perdas através de parâmetros denominados $[p]$ e $[q]$. Estes parâmetros são responsáveis pela determinação da probabilidade de transição entre os estados.

No modelo de Gilbert-Elliot os estados descrevem o comportamento dos dados no enlace de comunicação do WNCs, como exemplo: o estado 1 representa o sucesso no envio do dado e o estado 0 representa a perda da informação. Os parâmetros $[p]$ e $[q]$ são definidos como:

$$p = P[X_i = 1|X_{i-1} = 0] \quad (2)$$

$$q = P[X_i = 0 | X_i = 1] \quad (3)$$

As estimativas $\hat{p}$ e $\hat{q}$ podem ser obtidas por um estimador de máximo verossimilhança para conjunto de dados.

$$\hat{p} = n_{01}/n_0 \quad (4)$$

$$\hat{q} = n_{10}/n_1 \quad (5)$$

A determinação dos estimadores é representada pelo número de vezes que ocorre a transição de 0 para 1, n_{01} e pela análise de quantidade de vezes que a série vai de 1 para 0, n_{10} . Os parâmetros n_0 e n_1 referem-se respectivamente ao número de 0s e o número de 1s na série de dados. Os valores de p e q obtidos para cada distância de transmissão são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores médios calibrados para p e q

Razão de perdas	Parâmetros	
	p	q
10%	0.78	0.09
20%	0.55	0.13
30%	0.40	0.17
40%	0.36	0.23
50%	0.36	0.38

4 Simulação do WNCS com perdas

Para comparar a qualidade da representação dos modelos de Bernoulli e Gilbert perante as perdas de pacotes reais, 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 efetuar o controle de posicionamento de um motor, cuja a equação no espaço de estados é dado por

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -b/J & Kt/J \\ 0 & -Kv/L & -R/L \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix}$$

O motor utilizado na simulação consiste em um motor CC (Corrente contínua) de 90W (Watts), os parâmetros do motor são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Características do motor		
Parâmetros	Valores	
J	$6,28 \times 10^{-6}$	Kgm^2
b	2.1×10^{-6}	Nms/rad
Kv	0,118	Vs/rad
Kt	0,119	Nm/A
R	11,8	Ω
L	$6,16 \times 10^{-3}$	H

J consiste no momento de inércia do motor, b coeficiente de amortecimento viscoso, K_v consiste na constante de indução do rotor e k_t refere-se a constante de torque do motor. Outras variáveis do sistema são: θ que consiste no ângulo de posicionamento, $\dot{\theta}$ que representa a velocidade angular, L a indutância do núcleo e R a resistência deste. Os valores utilizados para a simulação são descritos em ULUSOY(2011).

Para a realização das simulações o sistema de controle contínuo foi convertido para um sistema discreto utilizando diferentes períodos de amostragem para avaliação do WNCS digital. Um dos sistemas discretizados utilizadas nas análises é mostrado na Figura 3. A função de transferência $H(z)$ do motor foi recalculada para cada período de amostragem através do método Zero Order Hold (ZOH).

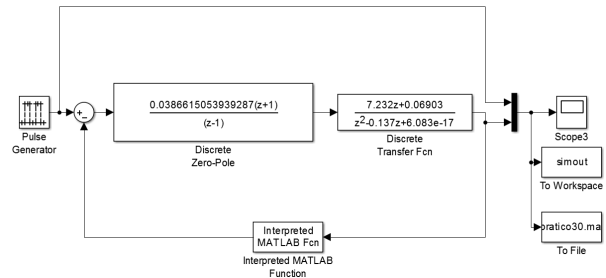


Figura 3: Planta utilizada na simulação do WNCS com período de amostragem de 10 ms.

Os parâmetros do controlador PID do sistema foram obtidos pelo método do LGR (Lugar Geométrico das Raízes), que foi desenvolvido para melhorar a resposta transitória e efetuar a correção do erro do sistema. O controlador foi projetado mediante ferramenta *SISOTOOL* (Matlab) e como parâmetros foram utilizados um *overshoot* de 20% e tempo de estabilização de 0.2s.

Os períodos de amostragem utilizados na análise são mostrados na Tabela 4:

A diferença entre a resposta do sistema y , a entrada de referência r , erro do sistema e , foi gravada para cada análise. O desempenho do sistema foi avaliado pelo coeficiente de determinação R^2 dado por

$$R^2 = 1 - \frac{(n-1) (SSE)}{(n-p) (SST)} \quad (6)$$

Tabela 4: Período de amostragem (ms) utilizados nas simulações

Análises	Períodos de amostragem (ms)
1	10
2	30
3	50
4	70
5	90
6	100

onde n consiste no número de observações da série, p representa o coeficiente de regressão, SSE consiste no somatório do erro quadrático, SST consiste no somatório quadrático total. Estas análises foram utilizadas para determinar se o modelo de Bernoulli ou modelo de Gilbert de perdas possuíam maior relação com o comportamento apresentado pela planta com caso real de perdas. Outra métrica utilizada na análise de desempenho dos modelos foi o RMSE (Root Mean Square Error) dado por:

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

onde, n é o número de amostras, y_i consiste no valor observado e r_i representa os valores modelados. Os valores RMSE obtidos também podem ser interpretados como percentuais pois os erros são relativos à diferença entre a saída e os degraus de valor unitário aplicados como entrada no sistema. Estas análises foram utilizadas para determinar se o modelo de Bernoulli ou modelo de Gilbert de perdas possuíam maior relação com o comportamento apresentado pela planta com caso real de perdas.

5 Resultados e Discussões

A seguir é mostrado o resultado da análises do WNCS de um motor CC com período de amostragem de 10ms. A FIGURA 4 mostra o comportamento do sinal de saída do WNCS para uma taxa de perdas de pacotes de 30%, a qual foi mensurada mediante comportamento real das perdas pelo protocolo IEEE 802.15.4. Nesta análise o RMSE do sistema foi de 0.3078.

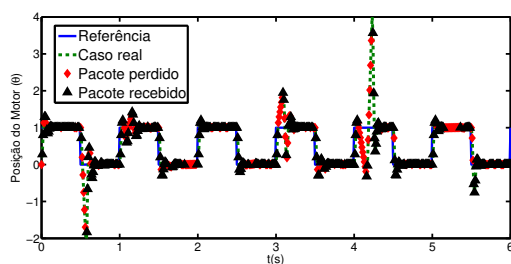


Figura 4: WNCS com caso prático de perdas.

As FIGURAS 5 e 6 mostram o RMSE e o R^2 para o caso real de perdas (R), e para os modelos de Gilbert-Elliot (G) e Bernoulli (B). A análise da FIGURA 5 foi obtida mediante execução de 20 medições com 10 mil pacotes, onde foi calculado o desvio padrão para cada medição e plotado o RMSE médio com intervalo de confiança de 95%. Para razões de perdas menores que 20% ambos os modelos de Gilbert-Elliot e Bernoulli proporcionam uma boa representação do comportamento do WNCS com perdas de pacotes. No entanto para altas taxas de perdas de pacotes apenas o modelo de Gilbert-Elliot apresentou um RMSE próximo do caso real de perdas, mostrando uma precisão maior na representação do WNCS com pacotes perdidos que o modelo de Bernoulli.

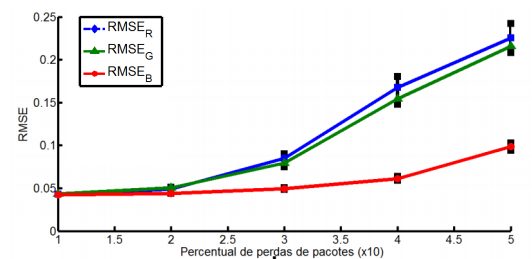


Figura 5: RMSE em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10ms.

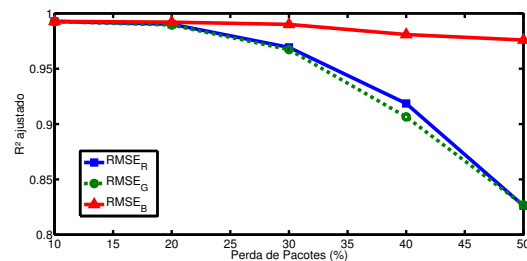


Figura 6: R^2 em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10ms.

Esta divergência entre os modelos de perdas de pacotes é também observada quando altera-se o período de amostragem do controlador do WNCS. A análise da FIGURA 7 mostra que o modelo de Gilbert-Elliot acarretou em um RMSE e R^2 similar ao caso real de perdas mesmo para outros períodos de amostragem, no caso: 10ms, 50ms e 100ms.

Nesta análise observa-se que para altas taxas de perdas de pacotes o modelo de Gilbert-Elliot mostrou-se mais acurado na representação da simulação. Isto mostra que o comportamento das rajadas dos pacotes perdidos influencia no desempenho do sistema e evidencia a acurácia do modelo de Gilbert-Elliot na representação do caso real de

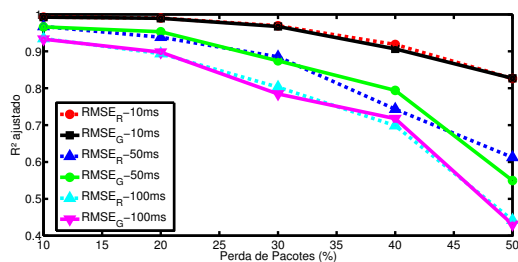


Figura 7: R^2 em função da razão de perdas de pacotes para períodos de amostragem de 10, 50 e 100ms.

perdas de pacotes em um WNCS.

6 Conclusão

O modelo de Bernoulli utilizado para simular o ambiente em questão apresentou-se menos acurado para taxas de perdas mais elevadas apresentando um erro superior e R^2 inferior ao obtido no caso real quanto o sistema foi submetido a razões de perdas de 20%, 30%, 40% e 50%. Entretanto para o caso onde as perdas foram menores que 20%, o modelo de Bernoulli apresentou-se acurado na representação do WNCS.

As outras análises efetuadas mostraram que o modelo de Gilbert-Elliott se apresenta bem acurado tanto para casos onde as taxas de perdas de pacotes são baixas, quanto para taxas mais elevadas. Por isso, é muito importante para simulações de WNCS considerar o modelo de Gilbert-Elliott e não o modelo de Bernoulli para perda de pacote, especialmente para taxas elevadas de perdas (acima de 20 %).

Referências

- Affi, G., Halawa, H. H., Daoud, R. M. and Amer, H. H. (2015). A zigbee-based industrial wlan, *Computer Engineering Systems (ICCES), 2015 Tenth International Conference on*, pp. 55–59.
- Chung, T. D., Ibrahim, R. B., Asirvadam, V. S., Saad, N. B. and Hassan, S. M. (2015). Simulation of wireless networked control system with packet dropout, *Control Conference (ASCC), 2015 10th Asian*, pp. 1–6.
- Godoy, E. P. and Porto, A. J. (2013). Co-simulation tools for networked control systems: Revision and utilization, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* **24**(6): 816–830.
- Gupta, R. and Chow, M.-Y. (2010). Networked control system: Overview and research trends, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **57**(7): 2527–2535.

Haßlinger, G. and Hohlfeld, O. (2008). The gilbert-elliott model for packet loss in real time services on the internet, *Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB), 2008 14th GI/ITG Conference-*, VDE, pp. 1–15.

Instruments, T. (2010). Smartrf packet sniffer-user manual, *Texas Instruments*.

Iqbal, A. and Khayam, S. A. (2012). Accurate residual wireless channel simulation using a two-tier markov model, *Simulation* **88**(8): 1011–1019.

Millan, Y. A., Vargas, F., Molano, F. and Mojica, E. (2011). A wireless networked control systems review, *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*, IEEE, pp. 1–6.

Shu, F., Sakurai, T., Zukerman, M. and Vu, H. L. (2007). Packet loss analysis of the ieee 802.15.4 mac without acknowledgements, *Communications Letters, IEEE* **11**(1): 79–81.

Song, Z. and Zhou, X. (2013). Research and simulation of wireless sensor and actuator networked control system, *Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese*, IEEE, pp. 3995–3998.

Tian, G., Tian, Y.-C. and Fidge, C. (2010). Performance analysis of ieee 802.11 dcf based wncs networks, *Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on*, IEEE, pp. 496–503.

Ulusoy, A., Gurbuz, O. and Onat, A. (2011). Wireless model-based predictive networked control system over cooperative wireless network, *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* **7**(1): 41–51.

XBee-PRO, O. and Modules, R. (2013). Product manual v1. 06, 2005, consulta en linea.

Yajnik, M., Moon, S., Kurose, J. and Towsley, D. (1999). Measurement and modelling of the temporal dependence in packet loss, *INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, Vol. 1, IEEE, pp. 345–352.