

AVALIAÇÃO SOBRE A INCLUSÃO DE ESTIMADORES BASEADOS EM FILTRAGEM DE KALMAN EM SISTEMAS DE CONTROLE VIA REDE

TANISIA C. FOLETTO*, VITOR M. MORAES*, UBIRAJARA F. MORENO*, ALÍRIO SÁ†, RAIMUNDO MACEDO†

*Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina
Caixa Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil

†Laboratório de Sistemas Distribuídos (LaSiD), UFBA, Campus Olinda, Salvador, BA, Brasil

Emails: {tanisia, rattus, ubirajara}@das.ufsc.br, {aliriosa, macedo}@ufba.br

Abstract— In this article is considered the problem of Networked Control Systems (NCS). The effect of the inclusion of estimators based on Kalman Filter is evaluated for wired (CAN and Ethernet) and wireless (IEEE 802.11) networks, considering delay variation and packet losses. The comparisons, performed from the simulation results, are analyzed using Quality of Control (QoC) criterion.

Keywords— Networked Control Systems, Kalman Filter, CAN, Ethernet, IEEE 802.11, Delay, Packet losses.

Resumo— Neste artigo é considerado o problema de Sistemas de Controle Via Rede (NCS). O efeito da inclusão de estimadores baseados no Filtro de Kalman é avaliado para redes cabeadas (CAN e Ethernet) e sem fio (IEEE 802.11), considerando atrasos variantes e perda de pacotes. As comparações, realizadas a partir dos resultados de simulação, são analisadas utilizando o critério da Qualidade de Controle (QoC).

Keywords— Sistemas de Controle Via Rede, Filtro de Kalman, CAN, Ethernet, IEEE 802.11, Atraso, Perda de pacotes.

1 Introdução

Em um sistema de controle tradicional, os dispositivos de campo (sensor e atuador) estão, em geral, conectados diretamente ao controlador de forma que os valores das variáveis estão sempre disponíveis. Com a rápida expansão da tecnologia digital e visando diminuir os custos com cabeamento e manutenção, os sistemas de controle estão utilizando as redes de comunicação para interligar os elementos de campo e trocar informações, são os chamados Sistemas de Controle Via Rede (*ou NCS, de Networked Control Systems*). Como resultado desse rápido crescimento as questões de análise, modelagem e controle precisam ser reformuladas especificamente para os NCSs, oferecendo assim suporte ao projeto destes sistemas.

Os principais desafios no projeto e desenvolvimento de um NCS são os efeitos degenerativos, causados pela inclusão da rede de comunicação no sistema de controle em malha fechada. O desempenho e a estabilidade acabam sendo deteriorados pela presença dos atrasos de comunicação ou pela perda de informações entre os sensores, atuadores e controladores (Zhang et al., 2001).

Em redes cabeadas a presença de atrasos é mais comum devido a filas e colisões no momento da transmissão. O tempo de transmissão de uma mensagem nem sempre é constante, já que depende de características da rede, tais como protocolos de acesso ao meio, taxa de transmissão, carga sobre a rede entre outros. A variação do atraso de controle é denominada como o jitter de controle.

Os atrasos aleatórios têm sido modelados

usando diversas formulações: em (Nilsson et al., 1998; Zhang et al., 2008) são apresentados métodos estocásticos, em (Cervin et al., 2004; Perez et al., 2006) são estudados métodos baseados em técnicas frequenciais e um estudo utilizando função de Lyapunov é mostrado em (Naghshtabrizi et al., 2005). As perdas de pacotes em sistemas de controle distribuídos utilizando redes sem fio, é uma área de pesquisa nova e em expansão. Nos estudos preliminares a estabilidade de sistemas sujeitos a perdas de pacotes foi analisada em (Zhang et al., 2001). Aproximações para compensar a perda de pacotes foram propostas em (Nilsson, 1998) e (Hadjicostis et al., 2002). Em (Azimi-Sadjadi, 2003) são propostas condições para que um NCS sujeito a perda de pacotes seja estável. Em (Schenato et al., 2007) é feita uma análise da filtragem de Kalman e o controle LQG para um sistema discreto onde a perda de pacotes é um processo aleatório de Bernoulli. Em (Sinopoli et al., 2004) é discutido o quanto a perda de pacotes pode afetar a estimação de estados em um NCS, eles ainda mostram que existe um limiar de perdas para o qual a estimação se torna inviável. Em (Gupta et al., 2006) é estendido o trabalho de (Sinopoli et al., 2004) onde pacotes vindos de múltiplos sensores podem ser perdidos independentemente.

A proposta deste artigo é avaliar a influência da utilização de estimadores baseados no filtro de Kalman, seguindo a abordagem proposta em (Sinopoli et al., 2004), em malhas de controle que utilizam controladores projetados considerando o jitter e a perda de pacotes. A avaliação é realizada para NCS simulados em três tipos de rede:

cabeadas, com protocolos de acesso ao meio CAN e Ethernet e redes sem fio com o padrão IEEE 802.11. Para as redes cabeadas serão analisados os atrasos induzidos pela rede enquanto que para redes sem fio analisaremos as perdas de pacotes.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são descritos os tipos de protocolos de redes que serão analisados. Na seção 3 é apresentada a métrica de desempenho utilizada nas simulações, a Qualidade de Controle. Uma breve introdução ao Filtro de Kalman é apresentada na seção 4 e na seção 5 é descrito o Filtro de Kalman para perda de pacotes. Na seção 6 são apresentados os resultados numéricos obtidos a partir de simulações, comparando a resposta do NCS com Filtro de Kalman em redes cabeadas com atrasos e rede sem fio com perdas. Por último, são apresentadas as conclusões.

2 Características dos protocolos de comunicação CAN, Ethernet e IEEE 802.11

Nas redes de controle, os dispositivos conectados têm que compartilhar da melhor maneira possível o meio disponível para a troca de informações, como solução para este problema, diversos protocolos de comunicação para NCSs têm sido pesquisados e desenvolvidos (Yang, 2006). Os protocolos, mais usuais para aplicações em controle são: Ethernet, CAN e IEEE 802.11. A Ethernet se destaca devido ao seu baixo custo e às altas taxa de transmissão, no entanto é uma rede não determinística onde mensagens são transmitidas aleatoriamente, podendo colidir quando mais de um nó tenta transmitir mensagens simultaneamente, ocasionando atrasos e perdas de pacotes. As redes CAN foram desenvolvidas para aplicações na indústria automotiva e são capazes de oferecer bom desempenho, pois são atribuídas prioridades às mensagens na disputa pelo meio. As suas principais desvantagens são as baixas taxas de transmissão e os atrasos na transmissão das mensagens (Lian et al., 2001). As redes sem fio diferentemente das redes cabeadas, que utilizam um meio físico para a transmissão de dados, permitem a conexão entre diferentes pontos por meio de radiofrequência (comunicação via ondas de rádio) ou comunicação via infravermelho, as desvantagens são as baixas taxas de transmissão e a perda de pacotes devido a interferência, desvanecimento ou multipercurso. O padrão 802.11 define as características da camada física e da camada de controle de acesso ao meio (MAC) para redes locais sem fio. Atualmente o IEEE 802.11 é o padrão para as redes locais sem fio (WLAN).

3 Qualidade de Controle (QoC)

Para avaliar a resposta do NCS na presença do estimador será utilizada a métrica para análise de performance denominada Qualidade de Controle (QoC). Esta métrica, é definida em função do erro do sistema em malha fechada, foi introduzida por (Martí et al., 2004) e é baseada no índice de desempenho IAE (*Integral of Absolute Error*). A QoC é definida como:

$$QoC = \frac{1}{IAE} \quad (1)$$

onde IAE é definido como:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

Um bom desempenho está associado a um baixo valor do IAE e conseqüentemente um desempenho ruim a um alto valor do IAE.

4 Filtragem de Kalman para sistemas discretos

O Filtro de Kalman (Kalman, 1960) é um algoritmo recursivo¹, capaz de estimar as variáveis de estado de sistemas representados por equações de estados lineares. A principal vantagem do método recursivo é sua eficiência computacional em comparação com métodos clássicos. Outra diferença importante desse filtro é o fato de atualizar os cálculos a cada nova medida que é fornecida pelo sistema observado, deste modo não é necessário conhecer de antemão todas as medidas anteriores.

O Filtro de Kalman pressupõe que o sistema seja perturbado por ruídos brancos e gaussianos, de forma que os estados possam ser tratados como variáveis aleatórias gaussianas.

O problema de filtragem de Kalman consiste na tentativa de estimar os estados de um sistema de controle discreto no tempo, governado por uma equação estocástica linear. A estimação de estados de um sistema discreto linear invariante no tempo é definida pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (3)$$

onde, $k \in \mathbb{N}$, $x_k \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $y_k \in \mathbb{R}^m$ é a saída do sistema e $u_k \in \mathbb{R}^p$ representa o vetor de entradas. As variáveis $w_k \in \mathbb{R}^n$ e $v_k \in \mathbb{R}^m$ são ruídos Gaussianos independentes de média nula e matrizes de covariância $Q \geq 0$ e $R > 0$, respectivamente. No contexto de filtragem de Kalman é comum referir-se à variável w_k como sendo o ruído do processo e v_k o ruído

¹Um algoritmo é dito recursivo quando é possível estimar os parâmetros de um determinado modelo à medida que os dados do processo são disponibilizados.

da medição, sendo essas variáveis caracterizadas pelas seguintes distribuições probabilísticas:

$$\begin{aligned} p(w) &\approx N(0, Q) \\ p(v) &\approx N(0, R) \end{aligned} \quad (4)$$

4.1 Caracterização Computacional do Filtro de Kalman

Consideremos $\hat{x}_{k+1|k}$ uma estimativa a priori do vetor de estados no instante $k+1$ obtida a partir de informação disponível no instante k e $\hat{x}_{k+1|k+1}$ a estimativa a posteriori com base na leitura feita no instante $k+1$. É possível definir a partir disto o erro de estimação a priori (equação (5)) e a posteriori (equação (6)):

$$e_{k+1|k} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k} \quad (5)$$

$$e_{k+1|k+1} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k+1} \quad (6)$$

as matrizes de covariância associadas a $e_{k+1|k}$ e a $e_{k+1|k+1}$ são, respectivamente:

$$P_{k+1|k} = E[e_{k+1|k} e_{k+1|k}'] \quad (7)$$

$$P_{k+1|k+1} = E[e_{k+1|k+1} e_{k+1|k+1}'] \quad (8)$$

onde a operação (M') denota a transposta de uma matriz M e $E[\cdot]$ denota o valor esperado condicional dadas as informações até o instante k .

O objetivo do Filtro de Kalman é encontrar uma equação que calcula uma estimativa de estado a posteriori, como uma combinação linear de uma estimativa a priori e uma diferença ponderada entre a medida atual e uma predição da medida, como mostra a equação:

$$x_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_k(y_k - C\hat{x}_{k+1|k}) \quad (9)$$

onde a matriz K_k é denominada ganho de Kalman e é obtida por meio da minimização da matriz de covariância a posteriori, sendo sua expressão dada por:

$$K_k = P_{k+1|k} C' (C P_{k+1|k} C' + R)^{-1} \quad (10)$$

4.2 Algoritmo para o Filtro de Kalman Discreto

Na seção anterior foi dada uma visão geral do Filtro de Kalman discreto, a seguir será apresentado as equações específicas e o seu algoritmo. O Filtro de Kalman compreende duas etapas fundamentais predição e correção, para cada etapa temos um conjunto de equações a serem aplicadas: equações de atualização de tempo e equações de atualização de medida. As equações de atualização de tempo são responsáveis por projetar adiante o estado atual, e o estimador da covariância do erro para obter um estimador a priori para o próximo instante. As equações de atualização de medida são responsáveis pela realimentação, isto é, incorporar uma medida nova na estimativa a priori para obter um estimador melhorado a posteriori.

As equações específicas para as atualizações de tempo são dadas pelas equações (11) e (12) as equações (14) e (15) são as atualizações da medida e são dadas por:

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k} + Bu_k \quad (11)$$

$$P_{k+1|k} = AP_{k|k}A' + Q \quad (12)$$

$$K_k = P_{k+1|k} C' (C P_{k+1|k} C' + R)^{-1} \quad (13)$$

$$x_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_k(y_k - C\hat{x}_{k+1|k}) \quad (14)$$

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_k C) P_{k+1|k} \quad (15)$$

Na figura 1 é mostrado com detalhes a implementação do algoritmo do Filtro de Kalman, para as condições iniciais $\hat{x}_{0|0}$ e $P_{0|0}$.

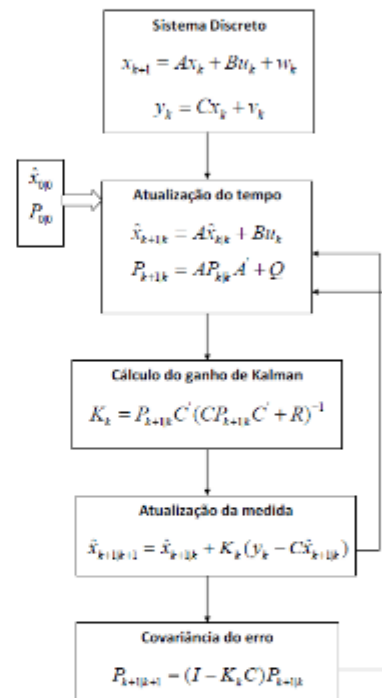


Figura 1: Implementação do algoritmo do Filtro de Kalman.

5 Filtragem de Kalman para uma rede não confiável

Nesta seção será considerado o problema de estimação de estados para um NCS com perdas de pacotes e atrasos quando dados são transmitidos por meio de uma rede não confiável, a análise é baseada na proposta de Sinopoli et al. apresentada em (Sinopoli et al., 2004). Do ponto de vista da teoria de controle atrasos significativos são equivalentes a perdas, já que os dados precisam chegar a tempo de serem usados pelo controlador e assim não afetar o desempenho do sistema (Sinopoli et al., 2004).

No cenário proposto pelos autores, o sensor fornece medidas ao estimador por meio de uma

rede não confiável, que estima os dados e os fornece ao controlador como é mostrado na figura 2.

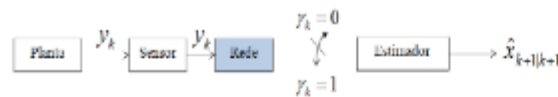


Figura 2: Esquema geral da transmissão de dados em uma rede.

A perda é indicada através de uma variável aleatória γ_k que indica se a medida foi ou não entregue corretamente, isto é, $\gamma_k = 0$ se o pacote é perdido ou $\gamma_k = 1$ caso contrário.

Em (Sinopoli et al., 2004) mostraram que mesmo com perdas de pacotes o Filtro de Kalman ainda é ótimo nesse cenário. As modificações no filtro foram realizadas nas equações de atualização de tempo (equações (14) e (15)). Deste modo as equações tornam-se:

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k} \quad (16)$$

$$P_{k+1|k} = AP_{k|k}A' + Q \quad (17)$$

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + \gamma_{k+1}K_{k+1}(y_{k+1} - C\hat{x}_{k+1|k}) \quad (18)$$

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - \gamma_{k+1}K_{k+1}CP_{k+1|k} \quad (19)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1|k}C'(CP_{k+1|k}C' + R)^{-1} \quad (20)$$

as equações (16) e (17) são as atualizações de tempo (predição), as equações (18) e (19) são as equações de atualização das medidas (correção) e $P_{k+1|k}$ e $P_{k+1|k+1}$ são as covariâncias a priori e a posteriori respectivamente.

Diferentemente do problema tradicional de filtragem de Kalman onde $\hat{x}_{k+1|k+1}$ e $P_{k+1|k+1}$ eram determinísticos, aqui a aleatoriedade da perda na rede os torna aleatórios também. A equação de atualização da covariância a priori ainda pode ser escrita como:

$$P_{k+1} = AP_kA' + Q - \gamma_kAP_kC'(CP_kC' + R)^{-1}CP_kA' \quad (21)$$

Em (Sinopoli et al., 2004) ainda são estudadas as propriedades de convergência estatísticas da covariância do erro, mostrando a existência de um valor crítico para a chegada de pacotes, para o qual o erro diverge se ultrapassar esse valor. Nessa análise os autores não estavam preocupados com o tipo de protocolo de rede utilizado, foi realizada apenas uma análise teórica do problema.

6 Aplicação e Simulação

O principal objetivo destas simulações é analisar o desempenho de um NCS com atrasos e perdas de pacotes na presença de um Filtro de Kalman, para redes cabeadas com protocolos CAN e Ethernet e rede sem fio com protocolo IEEE 802.11. As taxas de transmissão utilizadas foram de 1Mbits/s (CAN), 1000Mbits/s (Ethernet) e 52Mbits/s

(IEEE 802.11). A ferramenta computacional utilizada foi o TrueTime (Henriksson et al., 2002). No NCS as medições são realizadas periodicamente pelo sensor e então transmitidas por meio da rede para o controlador. A topologia de rede para o sistema em malha fechada é mostrada na figura 3.

O processo e o controlador são mostrados nas equações (22) e (23) e foram abordadas por (Perez et al., 2006), onde o controlador foi obtido a partir do procedimento de *co-design* com alocação de pólos para o período de amostragem $h_1 = 0.85ms$.

$$P_1(s) = \frac{-1064}{(s - 36.16)(s + 36.16)} \quad (22)$$

$$K_1(z) = \frac{-214z^2 + 399.9z - 186.7}{z^2 - 1.48z + 0.4797} \quad (23)$$

Os parâmetros do Filtro de Kalman são dados a seguir e foram determinados por meio de simulações.

$$Q = \begin{bmatrix} 500 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R = [0], \hat{x}_{0|0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, P_{0|0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Duas situações comparando a resposta do NCS com Filtro de Kalman são apresentadas. Na primeira será analisado o desempenho do NCS para redes cabeadas com atrasos aleatórios na entrega de pacotes, que será devido à presença de mensagens periódicas que geram uma carga extra. Na segunda serão consideradas taxas de perda de pacotes para rede sem fio.

6.1 O algoritmo de implementação do Filtro de Kalman no NCS

A seguir são descritos os passos da implementação do Filtro de Kalman em um NCS.

1. O sensor envia uma mensagem para a rede, periodicamente, com período de amostragem h_1 ,
2. O estimador é discretizado para o mesmo período de amostragem,
3. Após a mensagem ser amostrada e enviada pelo sensor através da rede o estimador irá esperar até no máximo um período de amostragem pra ser ativado, se no momento da ativação a medida não estiver chegado, ou por estar perdida ou atrasada, o estimador assume como zero e faz o cálculo de atualização da medida e envia a medida estimada para o controlador,
4. Inicialização do estimador com as estimativas iniciais $\hat{x}_{0|0}$ e $P_{0|0}$,
5. Atualização do tempo,

- $\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k}$
- $P_{k+1|k} = AP_{k|k}A' + Q$

6. Atualização da medida,

- Calcula o Ganho de Kalman $K_{k+1} = P_{k+1|k} C' (C P_{k+1|k} C' + R)^{-1}$
- Atualiza a variável de estado, $\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + \gamma_{k+1} K_{k+1} (y_{k+1} - C \hat{x}_{k+1|k})$
- Atualiza a matriz de covariância: $P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - \gamma_{k+1} K_{k+1} C P_{k+1|k}$

7. Calcula a saída estimada $y_e = C \hat{x}_{k+1|k+1}$ e envia para o controlador,

8. As medidas calculadas nesta etapa do algoritmo serão armazenada e utilizadas para o passo seguinte (próxima amostragem) para o cálculo da atualização da variável de estado.

6.2 Situação 1

Na primeira situação de simulação serão consideradas as redes cabeadas com protocolos CAN e Ethernet. A planta, o controlador, o sensor, o atuador e nós de interferência estão todos em nós distintos compartilhando uma mesma rede. O estimador receberá as medidas enviadas pelo sensor através da rede, como é mostrado na figura 3. Com esta estratégia é possível melhorar o desempenho do NCS, que será afetado pelos atrasos que serão devidos a carga de interferência que foi adicionada na rede, fazendo com que uma medida, ainda que estimada, esteja disponível no controlador para executar o algoritmo de controle em um determinado período de amostragem.

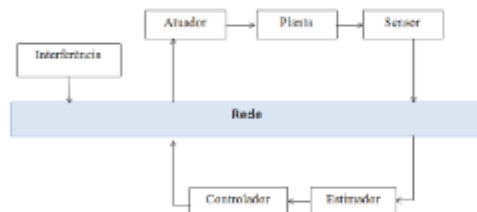


Figura 3: Topologia da rede para a implementação do projeto NCS com estimador.

Na situação proposta h_1 é período de amostragem da planta e h_2, h_3, h_4, h_5 e h_6 são os períodos de amostragem das cinco tarefas de interferência periódicas que foram adicionadas à rede. Ainda existem mais duas tarefas de interferência que são dirigidas a eventos, pois recebem mensagens das tarefas periódicas h_2 e h_3 e enviam novamente para elas as medidas através da rede. Os períodos de amostragens que foram utilizados são apresentados na Tabela 1.

Foram criados dois cenários de simulação a fim de gerar atrasos na rede mantendo a planta estável, isto é, de modo que os atrasos não gerem perda de *deadlines*, somente degradem o desempenho da planta. No segundo cenário os períodos

de amostragem foram diminuídos, para que deste modo atrasos maiores sejam gerados.

Tabela 1: Intervalos de ativação das mensagens em milissegundos.

Cenário	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
1	0.85	0.84	3.7	1.1	1.1	1.1
2	0.85	0.84	3.7	0.6	0.48	0.54

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados das simulações dos dois cenários propostos para as redes CAN e Ethernet. Onde foi calculado a qualidade de controle para o NCS com e sem estimador, para realizarmos a análise do desempenho do sistema na presença do estimador.

Tabela 2: Qualidade de Controle (QoC) da planta com e sem estimador para protocolo CAN.

CAN	Com Estimador	Sem Estimador
Cenário 1	129.9990	123.3706
Cenário 2	133.6557	118.3882

Tabela 3: Qualidade de Controle (QoC) da planta com e sem estimador para protocolo Ethernet.

Ethernet	Com Estimador	Sem Estimador
Cenário 1	135.9120	131.1034
Cenário 2	135.9893	131.2639

Na figura 4 são representados os escalonamentos das mensagens enviadas do sensor para o estimador com os protocolos CAN e Ethernet, até o instante de 7ms. A representação se dá por meio de três níveis: o nível baixo representa que não se deseja enviar uma mensagem, o nível médio significa que o nó aguarda a liberação do barramento para tentar enviar a mensagem e o nível alto representa o momento que a mensagem está sendo transmitida. Pode-se perceber que o distanciamento entre as transmissões para o protocolo Ethernet se mantém constante durante as transmissões, isto é, as transmissões ocorrem periodicamente, sem atrasos nesses 7ms. No entanto, para redes CAN essas transmissões não se apresentam periodicamente e ocorrem níveis médios com maior frequência mostrado mais espera para transmitir as mensagens, portanto os atrasos são mais frequentes durante as transmissões. Com maiores atrasos, devido a menor taxa de transmissão, a performance do sistema, com rede CAN, apresentará uma piora mais significativa. Comparando as Tabelas 2 e 3 nota-se que a QoC em rede Ethernet é maior e portanto tem melhor desempenho.

A partir dos resultados obtidos notamos que a presença do estimador em um NCS com atrasos é capaz de melhorar o desempenho do sistema já

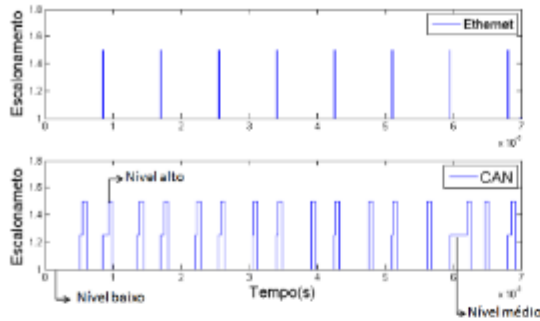


Figura 4: Escalonamento das medidas entregues no estimador.

que conseguimos aumentar a QoC quando o estimador é inserido no sistema para os dois protocolos na presença de atrasos. Pode-se observar

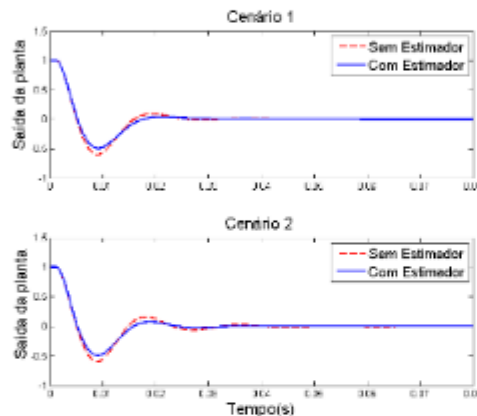


Figura 5: Saída da planta com e sem estimador para rede CAN.

a partir das respostas em malha fechada apresentadas nas figuras 5 e 6 que a degradação sofrida pelas malhas é amenizada com a presença do estimador, compensando assim a presença dos atrasos.

6.3 Situação 2

Na segunda situação de simulação será considerada uma rede sem fio, com protocolo IEEE 802.11. Analisaremos o desempenho de controle para dois casos de perda de pacotes, um com taxa de perda de (20%) e outro com (45%). O sistema planta/controlador utilizado será o mesmo da situação anterior, no entanto o cenário será composto apenas pelo NCS e não serão consideradas tarefas de interferências já que estamos interessados em perdas apenas. A topologia de rede é mostrada na figura 7. Para se obter as taxas de perdas especificadas no projeto, utilizou-se uma distribuição de Bernoulli de espaço amostral $\{0, 1\}$, onde 0 indica a perda e 1 a entrega com sucesso.

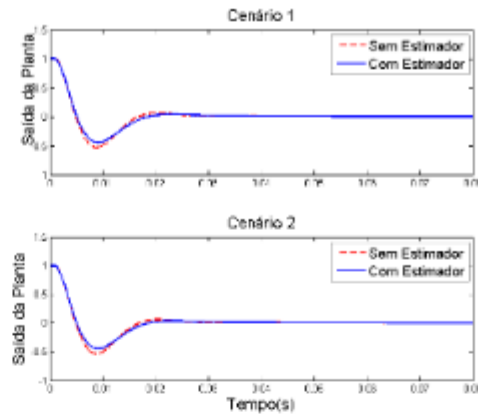


Figura 6: Saída da planta com e sem estimador para rede Ethernet.

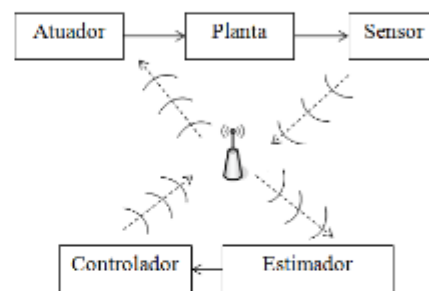


Figura 7: Topologia de uma rede sem fio.

Conforme os resultados da QoC apresentados na Tabela 4, é possível perceber a melhora no desempenho do NCS na presença do estimador. Outra observação importante que salientamos aqui é quanto a QoC que foi preservada, isto é, elevando a taxa de perda de pacotes para 45% foi possível recuperarmos a performance para o valor anterior sem estimador. A melhora na QoC do sistema também pode ser observada na figura 8, que mostra a resposta do sistema.

7 Conclusões

Ao fazermos uma análise comparativa entre redes cabeadas e redes sem fio, é possível perceber que a performance do sistema fica mais comprometida na presença de perdas de pacotes quando utilizamos redes de comunicação. Outro fato que pode ser destacado é a respeito da melhora no desempenho, tanto para redes cabeadas quanto para

Tabela 4: Qualidade de Controle (QoC) da planta com e sem estimador para uma rede sem fio com protocolo IEEE 802.11.

IEEE 802.11	Com Estimador	Sem Estimador
20% de perdas	133.9200	112.8296
45% de perdas	133.0083	76.9762