



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Rômulo Thaygor Hatakeyama Alves

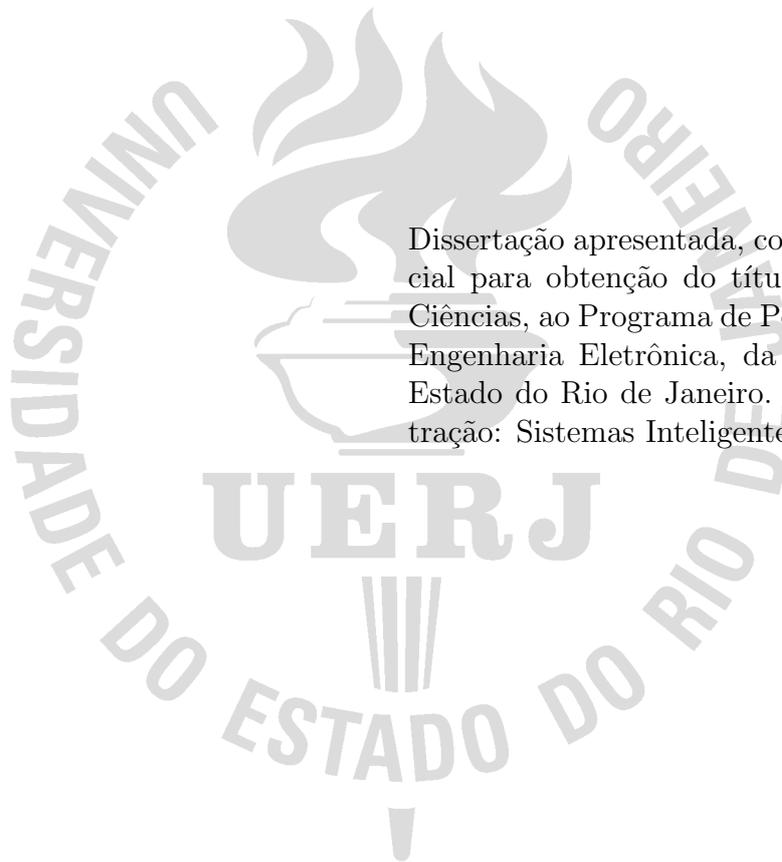
**CONTROLE POR MODO DESLIZANTE PARA SISTEMAS
COM ATRASOS DE COMUNICAÇÃO ESTOCÁSTICOS**

Rio de Janeiro

2022

Rômulo Thaygor Hatakeyama Alves

**CONTROLE POR MODO DESLIZANTE PARA SISTEMAS COM
ATRASOS DE COMUNICAÇÃO ESTOCÁSTICOS**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientador: Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha, D.Sc.

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A474 Alves, Rômulo Thaygor Hatakeyama.
Controle por modo deslizante para sistemas com atrasos de
comunicação estocásticos / Rômulo Thaygor Hatakeyama Alves. –
2022.
97f.

Orientador: José Paulo Vilela Soares da Cunha.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Sistemas de controle
inteligente - Teses. 3. Processo estocástico - Teses. 4.
Controladores programáveis - Teses. I. Cunha, José Paulo Vilela
Soares da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 681.514

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou
parcial desta tese, desde que citada a fonte.


Assinatura


Data

Rômulo Thaygor Hatakeyama Alves

**CONTROLE POR MODO DESLIZANTE PARA SISTEMAS COM
ATRASOS DE COMUNICAÇÃO ESTOCÁSTICOS**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovada em 13 de Dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha, D.Sc. (Orientador)
PEL UERJ

Prof. Michel Pompeu Tcheou, D.Sc.
PEL UERJ

Alberto Mota Simões, D.Sc.
Instituto Militar de Engenharia - IME

Josiel Alves Gouvêa, D.Sc.
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca -
CEFET/RJ

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rômulo Teixeira e Midôri Elena, deixo minha total gratidão a tudo que fizeram e me deram para que hoje eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre me acompanhando nesta jornada da vida.

Agradeço a minha família, pela dedicação, carinho e compreensão.

Agradeço ao meu orientador, por me ajudar pacientemente nesta empreitada.

Agradeço a todos que direta e indiretamente contribuíram para que este sonho se tornasse possível.

A matemática é a linguagem a qual Deus escreveu o universo.

Galileu Galilei

RESUMO

ALVES, Rômulo Thaygor Hatakeyama. *Controle por Modo Deslizante para Sistemas com Atrasos de Comunicação Estocásticos*. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Nesta Dissertação é proposto o uso de observador de estados para compensar atrasos estocásticos de comunicação em um sistema de controle por modo deslizante. A estratégia proposta é capaz de compensar os atrasos e fornecer ao controlador as estimativas dos estados em tempo contínuo. Os sinais provenientes dos sensores localizados na planta são amostrados periodicamente e enviados por uma rede de comunicação até o observador de estados. Os atrasos induzidos pela rede variam estocasticamente e são conhecidos. Além disso, na análise de estabilidade, é usado o conceito da estabilidade quase certa, que proporciona um resultado muito satisfatório e menos conservador. Assim, combinando técnicas conhecidas com novas metodologias, obtém-se um bom resultado na compensação de atrasos com características estocásticas. Ao longo do trabalho exemplos ilustram as ideias apresentadas, simulando condições normais de operação e condições que visam estressar e reforçar a importância da compensação dos atrasos em se tratando de controladores por modo deslizante.

Palavras-chave: Controle por Modo Deslizante. Observador de Estado. Controle por Rede de Comunicação. Atrasos Estocásticos de Comunicação.

ABSTRACT

ALVES, Rômulo Thaygor Hatakeyama. *Sliding-Mode Control for Systems with Stochastic Communication Time-delays*. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

This work proposes the use of a state observer in order to compensate stochastic time-delays in a sliding mode control system. The proposed strategy is able to compensate the delays and provide the controller the state estimates in continuous time. Signals from sensors located in the plant are periodically sampled and sent over a network to the state observer. The networked induced delays are considered as known and they vary stochastically. Furthermore, in the stability analysis, the concept of almost sure stability is used, which provides a very satisfactory and less conservative result. Thus, combining known techniques with new methodologies, a good result is obtained in compensating delays with stochastic characteristics. Illustrative examples are presented throughout this study, simulating normal operating conditions and conditions that aim to stress and reinforce the importance of delay compensation in the case of sliding mode controllers. Keywords: Sliding Mode Control. State Observer. Networked Control System. Stochastic Time-delays.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Possíveis diferentes tipos de topologias para uma rede LR-WPAN, baseado em (SADIKIN; DEURSEN; KUMAR, 2020) e (FALUDI, 2011).	23
Figura 2 - Topologias e principais elementos previstos para o WirelessHART, baseado em (LUGLI; SANTOS, 2013).	27
Figura 3 - Distribuição do atraso de comunicação. Fonte: (XINRAN; CHAO; YINGDUO, 2013), com adaptações.	31
Figura 4 - Atrasos de comunicação em uma rede ZigBee. Fonte: (GODOY; SCORZONI; PORTO, 2012), com adaptações.	32
Figura 5 - Esquemático da rede WirelessHART usada no experimento. Fonte: (HASSAN et al., 2017), com adaptações.	34
Figura 6 - Atrasos obtidos durante o experimento. Fonte: (HASSAN et al., 2017).	34
Figura 7 - Representação de um sistema de controle por rede de automação, baseado em (GAUTAM et al., 2021).	35
Figura 8 - Modo deslizante na interseção de duas superfícies de deslizamento, baseado em (DECARLO; ŽAK; MATTHEWS, 1988).	40
Figura 9 - Representação bidimensional do domínio do modo deslizante, baseado em (RIBEIRO, 2006).	41
Figura 10 - Modo deslizante com <i>chattering</i> , baseado em (SHTESSEL et al., 2014).	43
Figura 11 - Resposta ao degrau unitário.	47
Figura 12 - Sinal de controle.	48
Figura 13 - Plano de fase da trajetória em modo deslizante.	48
Figura 14 - Plano de fase da trajetória considerando atraso estocástico com valor máximo de 0,2 ms.	49
Figura 15 - Sinal de controle considerando atraso estocástico com valor máximo de 0,2 ms.	50
Figura 16 - Resposta ao degrau unitário do sistema considerando atraso estocástico com valor máximo de 0,2 ms.	50
Figura 17 - Resposta ao degrau unitário do sistema considerando atraso estocástico com valor máximo de 1 ms.	51
Figura 18 - Plano de fase da trajetória considerando atraso estocástico com valor máximo de 1 ms.	51
Figura 19 - Sinal de controle considerando atraso estocástico com valor máximo de 1 ms.	52
Figura 20 - Sinal de controle.	54
Figura 21 - Sinal de saída da planta em comparação com o sinal de saída desejado.	54
Figura 22 - Sinal de saída da planta em comparação com o sinal de saída desejado para o caso em há a presença de atrasos de comunicação estocásticos.	55
Figura 23 - Diagrama de blocos do observador de ordem plena, baseado em (HUSSEIN; SALIH; GHASM, 2017).	58
Figura 24 - Comparação entre a saída da planta $y(t)$ e a saída do observador $\hat{y}(t)$	59
Figura 25 - Comparação entre a saída da planta $y(t)$ e a saída do observador $\hat{y}(t)$ na presença de atrasos estocásticos que podem assumir valor máximo de até 1 ms.	59
Figura 26 - Observador de estados para o caso em que o sinal de saída da planta é amostrado e atrasado.	61

Figura 27 - Gráfico dos sinais amostrados e atrasados da saída da planta e do observador.	70
Figura 28 - Sistema de controle em estudos sujeito a atrasos estocásticos de comunicação.	71
Figura 29 - Histograma dos atrasos medidos para o protocolo ZigBee. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.	73
Figura 30 - Atrasos medidos durante a simulação.	73
Figura 31 - Erros de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2	74
Figura 32 - Comparação entre as variáveis de estado x_1 e x_2 e suas estimativas.	75
Figura 33 - Sinal de controle.	75
Figura 34 - Detalhe de quando o controle entra em modo deslizante.	76
Figura 35 - Sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.	76
Figura 36 - Gráfico ampliado do sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.	77
Figura 37 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$	77
Figura 38 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$ sem o uso de observador.	78
Figura 39 - Sinal de controle sem o uso de observador.	78
Figura 40 - Erro de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 quando usando o sinal $\bar{y}(t)$ na entrada do controlador.	79
Figura 41 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$ quando não há compensação do atraso no observador.	79
Figura 42 - Erro de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 quando a compensação do atraso no observador é retirada.	80
Figura 43 - Histograma dos atrasos medidos para o protocolo Wi-Fi no modo TCP. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.	81
Figura 44 - Atrasos medidos durante a simulação.	81
Figura 45 - Erros de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2	82
Figura 46 - Sinal de controle.	82
Figura 47 - Detalhe de quando o controle entra em modo deslizante.	83
Figura 48 - Sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.	83
Figura 49 - Gráfico ampliado do sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.	84
Figura 50 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$	85
Figura 51 - Sinal de controle sem a compensação dos atrasos.	85
Figura 52 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$ sem a compensação dos atrasos.	86
Figura 53 - Erro de estimação para as variáveis de estados x_1 e x_2 sem a compensação dos atrasos.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comportamento do protocolo ZigBee para diferentes distâncias. Fonte: (GODOY; SCORZONI; PORTO, 2012).	33
Tabela 2 - Dados coletados e estatísticos para o experimento com o protocolo ZigBee. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.	72
Tabela 3 - Dados coletados e estatísticos para o experimento com o protocolo Wi-Fi no modo TCP. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMC	<i>Sliding Mode Control</i> (Controle por Modo Deslizante)
VSC	<i>Variable Structure Control</i> (Controle a Estrutura Variável)
PAN	<i>Personal Area Networks</i> (Rede de Área Pessoal)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> (Fidelidade sem Fio)
WNCS	<i>Wireless Networked Control Systems</i> (Rede de Automação sem Fio)
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> (Protocolo de Controle de Transmissão)
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> (Protocolo de Datagramas do Usuário)
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> (Acesso múltiplo com verificação de portadora com anulação/prevenção de colisão)
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> (Industrial, Científica e Médica)
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i> (Rede de Área Pessoal a Baixa Taxas de Transmissão)
OSI	<i>Open System Interconnection</i> (Modelo Interconexão de Sistemas Abertos)
MAC	<i>Medium Access Control</i> (Controle de Acesso ao Meio)
FFD	<i>Full Function Devices</i> (Dispositivos de Função Completa)
RFD	<i>Reduced Function Devices</i> (Dispositivos de Função Reduzida)
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i> (Transdutor Remoto Endereçável)
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo)
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative controller</i> (Controlador Proporcional Integral Derivativo)
CLP	Controlador Lógico-Programável
DCS	<i>Distributed Control System</i> (Sistema Digital de Controle Distribuído)
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (Rede de Área Local sem Fio)
AP	<i>Access Point</i> (Ponto de Acesso)
TI	Tecnologia da Informação
ISA	<i>International Society of Automation</i> (Sociedade Internacional de Automação)
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> (Padrão de Criptografia Avançada)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
LTI	<i>Linear Time-Invariant</i> (Linear Invariante no Tempo)
ZOH	<i>Zero-Order Hold</i> (Segurador de Ordem Zero)
ISMC	<i>Ideal Sliding-Mode Control loop</i> (Laço de controle por modo deslizante ideal)

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
1	REDES DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	19
1.1	Redes Cabeadas	20
1.2	Redes sem Fio	21
1.2.1	<u>ZigBee</u>	23
1.2.2	<u>WirelessHART</u>	25
1.2.3	<u>Wi-Fi IEEE 802.11</u>	28
1.2.4	<u>ISA100.11a</u>	29
1.3	Atrasos de Comunicação em Redes de Automação	30
2	CONTROLE COM ESTRUTURA VARIÁVEL POR MODO DESLIZANTE	37
2.1	Controle por Modo Deslizante em Tempo Contínuo	39
2.1.1	<u>Formulação do Problema</u>	39
2.1.2	<u>A Superfície de Deslizamento</u>	39
2.1.2.1	Modo Deslizante	39
2.1.2.2	Condição de Existência do Modo Deslizante	40
2.1.3	<u>Lei de Controle</u>	42
2.1.4	<u>Fenômeno do <i>Chattering</i></u>	42
2.1.5	<u>Controle por Modo Deslizante em Tempo Contínuo para um Sistema LTI</u>	44
2.1.5.1	Análise da Estabilidade	45
2.1.6	<u>Exemplo Numérico</u>	46
2.1.6.1	Rastreamento de Trajetória	52
2.1.7	<u>Exemplo Numérico</u>	53
3	OBSERVADORES DE ESTADO PARA SISTEMAS COM ATRASOS ESTOCÁSTICOS	56
3.1	Observadores de Estado	56
3.1.1	<u>Projeto de Observadores de Estado</u>	57
3.1.2	<u>Exemplo Numérico</u>	58
3.2	Observadores de Estado para Sistemas com Atrasos de Características Estocásticas	60
3.2.1	<u>Projeto de Observadores de Estado</u>	61
3.2.1.1	Determinação da Matriz de Ganho do Observador	63
3.2.1.2	Análise da Estabilidade	65
3.2.1.3	Estabilidade do Sistema em Malha Fechada	67
3.2.2	<u>Exemplo Numérico</u>	69
4	RESULTADOS E SIMULAÇÕES	71
4.1	Apresentação do Sistema em Estudo	71
4.1.0.1	Resultados e Simulações Empregando o Protocolo ZigBee	72
4.1.0.2	Resultados e Simulações Empregando o Protocolo Wi-Fi no modo TCP	80
	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	88

INTRODUÇÃO

Com a iminente ascensão da Indústria 4.0, uma cadeia de inovações tecnológicas compõe o que promete ser a 4^a Revolução Industrial (SANTOS et al., 2018). Assim, a comunicação sem fio surge como uma possível tendência para ambientes industriais, gerando menos gastos na etapa de implementação e podendo ser reconfigurada com mais facilidade, quando comparada com redes cabeadas convencionais (BERTELLI, 2017).

Entretanto, mesmo possuindo características interessantes, como facilidades de instalação, de manutenção, de reconfiguração e de atualização, se comparadas com as redes cabeadas, o emprego das redes sem fio tem tido baixo proveito pelas indústrias. O fato é que a sua natureza estocástica, a confiabilidade abaixo de 100%, além da necessidade de estudos que formem um modelo de modo que venha a avaliar tais imperfeições neste tipo de comunicação, têm contribuído para este baixo aproveitamento (LIU, 2017).

Em se tratando de um padrão de comunicação sem fio para fins industriais, espera-se de um protocolo, que o mesmo tenha uma baixa latência, que seja capaz de otimizar o consumo de energia e que permita a implementação de vários nós e topologias, de uma maneira simples e rápida. O padrão ZigBee, em conjunto com o IEEE 802.15.4, permite não só atender a estes requisitos, mas também uniformizar o uso das redes pessoais (PAN – *Personal Area Networks*) (MONSIGNORE, 2007).

Muitos trabalhos vem sendo produzindo propondo e discutindo diversas aplicações para o ZigBee. Samijayani et al. (2020) retratam a combinação deste protocolo com o WiFi de modo a formar uma rede de monitoramento de cultivo de hortaliças hidropônicas. Já Xia et al. (2020) associam o ZigBee e o 4G a fim de criar um sistema de monitoramento em tempo real de um sistema de geração de energia elétrica por meio de placas solares fotovoltaicas. Por fim, Ding, Liu e Yue (2021) e Rašović e Mijanovic (2020) discorrem sobre o uso desta tecnologia na automação industrial, sobretudo em (DING; LIU; YUE, 2021), onde destaca-se que ela não irá competir com o WiFi, e sim integrar-se a ele.

O WiFi é um protocolo que surgiu em meados da década de 90, desenvolvido a partir de um consórcio internacional de empresas de tecnologia, com o objetivo de desenvolver padrões sem fio para a indústria. Assim, utilizando o protocolo IEEE 802.11, o WiFi veio a fim de permitir a interconexão de dispositivos sem fio, transmitindo dados a velocidades iguais ou superiores a 11 Mbps, dentro de um intervalo de 30 metros (ROSS, 2009). Segundo (AIJAZ, 2020), este protocolo propicia vários benefícios às redes industriais de automação, dentre eles a boa taxa de cobertura, a alta capacidade de transmissão de dados, a capacidade de transmissões paralelas para múltiplos usuários reduzindo a latência, dentre outros.

Tipicamente usado em ambientes domésticos e/ou voltados para o lazer e entretenimento, em Plets et al. (2016) efetuam um estudo sobre a aplicação da tecnologia

WiFi em um ambiente cheio de metais e de ampla extensão, como ambientes industriais. Os autores buscam chegar a uma solução que atenda satisfatoriamente e que seja capaz de minimizar as adversidades que o ambiente industrial, no caso um grande depósito de logística oferece a este tipo de comunicação.

Mesclando a tecnologia ZigBee com o WiFi, Afifi et al. (2016) realizaram um estudo que visa combinar os pontos positivos das duas tecnologias. Ainda, os autores efetuaram simulações para determinar o atraso de comunicação bem como a perda de pacote de dados advindo dos sensores. Ao colocar os dois tipos de comunicação *wireless* para operar em paralelo, os pesquisadores conseguiram melhorar a performance da rede, além de garantir uma confiabilidade de 95%.

Modelar a natureza estocástica do atraso e da perda de pacote de dados em Redes de Controle Sem Fio (WNCS - *Wireless Networked Control Systems*) vem sendo há um tempo objeto de estudos (YU; SHI; LIN, 2009). A depender do tipo de protocolo empregado, a perda de pacotes pode ser em maior ou menor grau. Além disso, atrasos de comunicação podem comprometer o desempenho do sistema e até leva-lo a condição de instabilidade (DAMAZO, 2008). Assim, em Delbari et al. (2013), os autores buscam determinar os impactos que o atraso de comunicação pode gerar no projeto do controlador, bem como sua interferência na sensibilidade do mesmo, ao efetuar simulações e comparações de resultados.

Os sistemas com atraso no tempo podem ser denominados como sendo: sistemas com tempo morto ou retardado; sistemas hereditários; sistemas com equações com argumentos divergentes; ou sistemas com equações de diferenças diferenciais (DDE - *Differential-Difference Equations*). Diferentemente do que ocorre com as Equações Diferenciais Ordinárias (EDO), os sistemas com atrasos pertencem a uma classe de Equações Diferenciais Funcionais (FDE - *Functional Differential Equations*), que são de dimensão infinita, elevando, dessa forma, o nível de complexidade de sua solução (RICHARD, 2003).

Uma das razões pelo estudo de sistemas com atraso no tempo é devido à necessidade de se elaborar um modelo matemático cujo comportamento seja o mais próximo possível do real (RIBEIRO, 2006). Como bem exemplificado por (RICHARD, 2003), a dinâmica interna de muitos sistemas das áreas de biologia; química; financeira; mecânica; engenharia; dentre outras, é a responsável por inserir atrasos. Tais atrasos podem comprometer o desempenho de controladores clássicos e levar o sistema à condição de instabilidade. Portanto, dada a multiplicidade de campos do saber onde esse tema pode ser explorado, é crescente o interesse de pesquisadores e engenheiros por esse estudo.

Ao longo do tempo, técnicas foram sendo desenvolvidas a fim de compensar ou mitigar atrasos em sistemas de controles, como o Preditor de Smith (SMITH, 1957) e a aproximação de Padé (ANDRIANOV; SHATROV, 1869). Ambas as técnicas têm seus méritos, sendo aplicadas em muitos trabalhos, como em (XING; PLOEG; NIJMEIJER, 2020), onde os autores utilizam o filtro preditor de Smith em um sistema de controle de

cruzeiro adaptativo e cooperativo de veículos de passeio automotores. Entretanto, a medida que incertezas, e sobretudo a característica estocástica dos atrasos são consideradas, tais técnicas podem apresentar alguma dificuldade na sua execução.

Em (ANDRADE; CUNHA, 2018), é apresentado um estudo sobre a estabilidade de sistemas com realimentação de estados, em que apresentam atrasos estocásticos ao utilizar uma rede sem fio. Os autores utilizam tanto o ZigBee quanto o WiFi (modo UDP e modo TCP) na execução do estudo, comparando, inclusive, estes tipos de tecnologia no que diz respeito ao atraso médio e a taxa de pacotes perdidos, por exemplo. Desta forma, comprovam graficamente a estabilidade de um sistema tanto para cada um dos protocolos escolhidos usando os atrasos que foram medidos experimentalmente.

O Controle por Modos Deslizantes (SMC - *Sliding Mode Control*) consiste em uma técnica de controle não-linear que busca alterar a dinâmica de um sistema não-linear, ao aplicar um sinal de controle chaveado que visa trazer o sistema para a “superfície deslizante”, a qual representa o comportamento desejado para o sistema. Trata-se de uma Técnica de Controle por Estruturas Variadas (VSC - *Variable Structure Control Method*), onde as múltiplas estruturas são projetadas fazendo com que a dinâmica do sistema “deslize” em uma região limitada: a superfície de deslizamento (UTKIN, 1978; UTKIN, 1983) e (SHAH; MEHTA, 2018a).

Esta técnica surgiu por volta de 1950, na extinta União Soviética. Foi inicialmente proposta por Emel’yanov e um grupo de pesquisadores, dentre eles Utkins e Itkis. Desde então, ela vem sendo extensivamente pesquisado pela área de controle, sobretudo de sistemas não-lineares, sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), modelos discretos, sistemas de larga-escala e infinita-dimensão e sistemas estocásticos (LIU, 2017).

Sistemas com atrasos no tempo vêm sendo objeto de estudos, pois se comparados a sistemas sem atrasos, quando operados em malha fechada, eles estão mais propícios a problemas com o desempenho. Ainda, em se tratando de sistemas que utilizem o Controle por Modos Deslizantes, dado que o sinal de controle é gerado a partir de um chaveamento de alta velocidade, o mesmo pode acabar não levando os estados da planta à superfície de deslizamento escolhida, caso o fenômeno de atraso não seja considerado no projeto (RIBEIRO, 2006).

No trabalho desenvolvido por Yan, Ding e Yang (2020), os autores estudam o emprego do Controle por Modos deslizantes em um sistema discreto sujeito a atrasos de comunicação constante e a perda de pacotes. Para tanto, é proposta uma combinação do SMC com a técnica de Controle Preditivo para Redes de Comunicação (em inglês, *Networked Predictive Control*).

Buscar alternativas que visam suprimir os atrasos no SMC trata-se de uma tarefa fundamental, dado que os mesmos são um problema de natureza prática com reais impactos no desempenho do controlador. Desse modo, Tugal et al. (2022), apresentam uma técnica que combina o Controle por Modo Deslizante com um estimador de atrasos

em um veículo subaquático. Ao tratar dos atrasos este método acabou fazendo com que exigisse menor esforço do controlador, contribuindo para uma melhor eficiência energética do equipamento (menos gasto de bateria).

Por fim, (SUN; CUI; ZHENG, 2022) investiga a aplicação do SMC em um sistema com incertezas estocásticas, sujeito a perturbações externa, com perdas de pacotes e com atrasos variantes. Para suprimir os efeitos das perdas de pacotes, os autores projetaram uma superfície de deslizamento robusta, e o controle por SMC conta com um termo que visa compensar as incertezas do sistema.

Objetivo

O objetivo principal desta pesquisa é realizar o estudo sobre atrasos de comunicações com características estocásticas, induzidos por determinadas redes de automação. Neste trabalho, será combinado o uso do controle por modo deslizante com um observador de estados aplicado em uma planta com acesso parcial aos estados de saída.

Desta forma, este trabalho tem como objetivos:

- Explicar sobre os principais agentes causadores dos atrasos de comunicação em redes de automação.
- Discutir sobre o desempenho de um sistema de controle por redes de automação, sobretudo na presença de atrasos de comunicação.
- Demonstrar os efeitos dos atrasos, quando não tratados, em um controlador por modo deslizante.
- Apresentar o uso de um observador de estados para compensar atrasos de comunicação com característica estocástica.
- Mostrar o funcionamento de um sistema sujeito a atrasos estocásticos de comunicação no sinal de saída da planta, empregando um observador de estados como estratégia de compensação dos atrasos.

Definições e Notações Básicas

- A norma de um vetor $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_n]^T \in \mathfrak{R}^n$ é denotada como $\|\mathbf{v}\| = \sqrt{v_1^2 + \dots + v_n^2}$.
- A esperança de uma variável aleatória X está sendo indicada por $E\{X\}$.
- A matriz identidade está sendo representada por $\mathbf{I} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$.

- Uma função $V : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}_+$ é dita como sendo positiva definida se $V(x) > 0$ para todo $x \neq 0$ e $V(0) = 0$ (KHALIL, 1996).
- O operador vec quando aplicado em uma matriz $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ cria um vetor ao empilhar seguidamente as suas colunas, ou seja (HENDERSON; SEARLE, 1981):

$$\text{vec}(\mathbf{H}) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}$$

- O produto de Kronecker entre duas matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{F} é definido como sendo o produto de cada elemento da matriz \mathbf{Q} pela matriz \mathbf{F} (SANTOS; JESUS; PALMEIRA, 2016) e (PASCOAL; SOUZA; OLIVIEIRA, 2017):

$$\mathbf{Q} \otimes \mathbf{F} = \begin{bmatrix} q_{11}[\mathbf{F}] & q_{12}[\mathbf{F}] & \dots & q_{1n}[\mathbf{F}] \\ q_{21}[\mathbf{F}] & q_{22}[\mathbf{F}] & \dots & q_{2n}[\mathbf{F}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1}[\mathbf{F}] & q_{m2}[\mathbf{F}] & \dots & q_{mn}[\mathbf{F}] \end{bmatrix}$$

- Considere as matrizes \mathbf{F} , \mathbf{G} e \mathbf{Q} de dimensões apropriadas. Assim,

$$\text{vec}(\mathbf{FGQ}) = (\mathbf{Q}^T \otimes \mathbf{F})\text{vec}(\mathbf{G})$$

onde \otimes corresponde ao produto de Kronecker (HENDERSON; SEARLE, 1981).

Organização da Dissertação

O presente trabalho está dividido em 4 capítulos, mais uma parte dedicada as conclusões finais.

No **Capítulo 1** é apresentada uma breve discussão sobre redes de automação industrial, focando sobretudo em algumas das principais redes sem fio e sua aplicação na área de automação industrial. Além disso, trata sobre os atrasos de comunicações e eventuais fontes geradoras.

O **Capítulo 2** discute sobre a técnica de controle por modo deslizante. Na parte final, simulações ilustram o funcionamento desta técnica de controle. Ainda, é apresentada uma simulação mostrando o impacto do atraso neste tipo de controle.

O **Capítulo 3** trata dos observadores de estado, começando pelo observador tradicional e encerrando com os uso de observadores para compensação de atrasos de comu-

nicação com características estocásticas.

O **Capítulo 4** combina o uso de observador de estado para compensar atrasos estocásticos com controle por modo deslizante. Dessa forma, é apresentada a importância do uso de observadores de estado para compensação de atrasos.

Por fim, o trabalho encerra-se apresentando conclusões finais, elencando as contribuições deste trabalho e apresentando perspectivas para estudos futuros.

1 REDES DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Segundo (FIALHO, 2011, p.15), a automação, no seu sentido mais amplo, pode ser definida como uma “expressão de progresso quando orientada para uma economia ou potencialização cada vez maiores da intervenção humana nas diversas manifestações, não só industriais como também gerais da vida social”. Assim, as indústrias (WANASINGHE et al., 2020; YAVARI et al., 2020), as residências (SEABRA; COSTA; LUCENA, 2016; YASHIRO et al., 2013) e até o modo de viver (WU et al., 2017; SHVAICHENKO et al., 2019) têm sofrido verdadeiras revoluções, caminhando para um mundo onde os mais diversos tipos de equipamentos estão conectados e trocando dados entre si.

Para tanto, torna-se necessário o uso de algum tipo de infraestrutura que permita a comunicação entre os mais variados dispositivos. Dessa forma, as redes de automação vieram acompanhando os avanços tecnológicos, propiciando a diminuição no uso de cabos, a facilidade na manutenção, a flexibilidade na configuração da rede e, sobretudo, a capacidade de se obter diagnóstico dos equipamentos. Além disso, pelo fato dessas redes usarem protocolos de comunicação digital padronizados, essas redes permitem a integração de vários tipos de aparelhos (ou maquinários), mesmo que eles sejam de fabricantes distintos (MORAES; CASTRUCCI, 2013).

Um aspecto importante e desejável sobre as redes industriais é a característica determinística (LUGLI; SANTOS, 2012). Dessa forma, os dados devem ser transmitidos em tempo real, de modo que essa tarefa seja executada em um tempo conhecido (tempo de varredura). Isso significa que a latência do sinal deve ser limitada e possuir uma baixa variância. Para essa variação entre o tempo projetado e o tempo real de resposta utiliza-se usar o termo *jitter*. Em se tratando de uma malha de controle industrial, baixos valores de *jitter* são requeridos, visto o impacto que a variação de tempo pode causar nos controles integral e derivativo. Além disso, em determinados métodos de processamento de sinais digitais, como a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), é primordial que os intervalos entre as amostras sejam fixos (GALLOWAY; HANCKE, 2013).

De acordo com o meio de transmissão adotado, uma rede de automação pode ser especificada como sendo cabeada (guiada) ou sem fio (não guiada), também chamada de *Wireless*. Para o primeiro caso, pode-se empregar como meio físico para o envio e recebimento de sinais, cabos de par trançado, cabo coaxial ou fibra óptica. Já para o segundo, por se tratar de ondas eletromagnéticas, não é necessário um meio físico para se propagar. Ainda, conforme apontado por (SAUTER, 2011), as redes de automação industrial podem ser divididas em três possíveis variantes. A primeira, consiste em protocolos baseados na comunicação serial; a segunda, protocolos Ethernet; e por fim, a última geração, que incorporou a comunicação sem fio.

1.1 Redes Cabeadas

As redes que utilizam um meio de transmissão guiado são aquelas que necessitam de um condutor físico para a interligação entre dispositivos. Desse modo, um sinal que estiver trafegando por esse meio, é direcionado e contido por limites físicos do meio ao qual está sujeito. Na construção de cabos de par trançados e coaxiais, por exemplo, utilizam-se geralmente o cobre. Nesse tipo de meio, os sinais transmitidos são na forma de corrente elétrica. Já no caso da fibra óptica, seu método construtivo é a partir de uma estrutura de vidro ou plástico e os sinais são transmitidos na forma de pulsos de luz.

- **Cabo de par trançado**

O cabo de par trançado é formado por dois condutores trançados, sendo cada um deles revestidos por um material plástico isolante. O objetivo do entrelaçamento é reduzir a indução de ruídos. Nesse cabo, um dos fios é usado para transportar sinais elétricos para o receptor, enquanto que o outro é empregado como terra de referência.

A principal vantagem do par trançado é o baixo custo, além da alta maleabilidade do mesmo. Por outro lado, eles são suscetíveis a interferências eletromagnéticas, embora possa ser feita uma atenuação com o uso de uma blindagem adequada.

- **Cabo coaxial**

O cabo coaxial apresenta um núcleo condutor central de fio torcido ou sólido envolto em um revestimento isolante que, por sua vez, é revestido por uma folha de metal condutora e um revestimento externo.

As suas características elétricas são bastante favoráveis à transmissão de sinais de alta frequência, uma vez que o mesmo possui uma boa imunidade a interferências externas. Além disso, possui uma capacidade de transmissão de dados bem maior que o par trançado, podendo inclusive ser multiplicada se for utilizada multiplexação por divisão de frequência, dividindo-o em subcanais, cada um com uma transmissão independente.

Uma vantagem do cabo coaxial é a sua eficiência, se comparado ao par trançado. Ainda, características elétricas são bastante favoráveis à transmissão de sinais de alta frequência. Todavia, este tipo de cabo não é tão flexível quanto o par trançado, o que pode dificultar um pouco a instalações em alguns casos.

- **Cabo fibra óptica**

A fibra óptica é construída sobre uma estrutura de vidro ou plástico, onde os sinais são transmitidos na forma de luz. Trata-se de um tipo de cabo excelente imunidade a ruídos e com uma capacidade de comunicação muito mais rápida que o par trançado e o coaxial.

Dentre as vantagens da fibra óptica, tem-se a total imunidade à interferência eletromagnética, o baixo peso e uma largura de banda muito mais ampla, se comparada com o par trançado ou o coaxial. No entanto, a instalação desse tipo de cabo requer cuidados extras, o que encarece a mão-de-obra, bem como o custo de aquisição do próprio cabo que é mais elevado.

Um protocolo de comunicação consiste em um conjunto de regras com o objetivo de controlar as comunicações de dados. Basicamente, cabe a ele definir o que é comunicado, como isso é comunicado e quando deve ser comunicado. Segundo (MORAES; CASTRUCCI, 2013), o protocolo de comunicação caracteriza-se como o elemento de maior relevância em uma rede de automação, fato este que normalmente acarreta na forma como a rede será nominada. Nos ambientes industriais, os protocolos mais usuais para redes cabeadas são: AS-Interface, MODBUS, CAN e PROFIBUS.

1.2 Redes sem Fio

A comunicação sem fio corresponde em um meio de transmissão não guiado, onde as ondas eletromagnéticas propagam-se sem a necessidade de um condutor físico. Assim, os sinais são normalmente transmitidos pelo espaço livre, tornando-se disponíveis a quaisquer dispositivos capaz de recebê-los. Ainda, os sinais não guiados podem trafegar da origem ao destino das seguintes maneiras: propagação terrestre, propagação ionosférica e propagação em linha visada (MORAES; CASTRUCCI, 2013).

Conforme (NECHIBVUTE; MUDZINGWA, 2013), o ZigBee, o WirelessHART e o ISA100.11a são os padrões de comunicação sem fio mais empregados em redes industriais, embora o protocolo ZigBee não atenda completamente todos os requisitos de confiabilidades exigidos em um processo de automação. Por outro lado, os padrões o WirelessHART e o ISA100.11a são capazes de oferecer mecanismos que aumentem a confiabilidade, como a escolha de canais que não estão em uso (*channel blacklisting*), e a constante mudança da onda portadora através de vários canais de frequência, usando uma sequência pseudo-aleatória que seja de conhecimento do transmissor e do receptor (*frequency hopping*).

O padrão IEEE 802.15.4 opera na banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Trata-se de um padrão de comunicação sem fio que define regras de comunicação da camada física e da camada de acesso ao meio para redes de comunicação sem fio de pequeno alcance e com baixas taxas de transmissão (LR-WPAN¹). Assim, segundo (SAUTER, 2011), esse padrão é quem rege o protocolo ZigBee, apontando esse

¹ LR-WPAN, do inglês, *Low Rate Wireless Personal Area Network*

como sendo um protocolo muito promissor para as redes de sensores sem fio, devido a sua capacidade de economia de energia. Ainda, tal padrão também é usado como base para os protocolos WirelessHART e ISA100.11a.

Uma rede do tipo LR-WPAN compreende uma rede simples, de baixo custo e que permite a conectividade de aplicações com potência limitada. Destaca-se ainda que esse tipo de rede oferece maior facilidade de instalação, uma transferência de dados mais confiável e um baixo consumo de energia. Evidenciam-se também, para este tipo de rede os valores de taxa de transmissão de dados de 250 kbps, 40 kbps e 20 kbps e o acesso ao canal no modo (CSMA/CA)².

A rede do tipo LR-WPAN, prevê topologias do tipo estrela (*star*), árvore (*cluster tree*) e malha (*mesh*). Na topologia estrela, cada dispositivo final (*end device*) comunica-se diretamente com o coordenador (dispositivo central), não existindo a figura do roteador. Já nas topologias árvore ou malha, existem dispositivos com função de roteador e de coordenador. Assim, a depender da organização da rede, sobretudo na composição do tipo malha, consegue-se excelentes níveis de robustez. Na Figura 1 pode-se verificar como é a disposição de cada uma das topologias previstas.

O padrão IEEE 802.15.4 define três tipos de papéis para os dispositivos que vão formar uma rede sem fio: PAN-coordenador, coordenador e dispositivos finais (*end devices*). Para o primeiro caso, cabe ao PAN-coordenador a tarefa de formar a rede sem fio. Já para o ZigBee, o coordenador é tratado como sinônimo de roteador, assumindo, portanto, a função de roteamento dos dados. Por fim, os dispositivos finais são os dispositivos de tarefas simples, como um sensor, por exemplo.

Um dos principais benefícios para a utilização de redes sem fio é a redução de custos com cabeamento, quer seja para alimentação de energia, a depender do protocolo, quer seja para a transmissão de informação. Além disso, a comunicação *Wireless* torna-se muito atrativa em ambientes industriais com atmosferas explosivas ou em equipamentos que estão em contante movimento, o que poderia acarretar em algum dano ao cabeamento de sinal. Somam-se a esses fatos o rápido comissionamento e reconfiguração. No entanto, Galloway e Hancke (2013) fazem ressalvas sobre o uso de redes sem fio em um ambiente industrial, ao afirmar que este tipo de comunicação é menos aplicado nesses tipo de ambiente ao contrário do padrão Ethernet, pois este foi nada menos que uma adaptação de uma tecnologia existente.

O padrão Wi-Fi IEEE 802.11 foi apresentado pela primeira vez em 1997. Uma das principais vantagens oferecidas por este padrão são a facilidade na aquisição de dispositivos

² Acesso múltiplo com verificação de portadora com anulação ou prevenção de colisão (em inglês, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Esta funcionalidade prevista no padrão IEEE 802.15.4 compreende em um método que visa evitar a colisão de dados. Antes que um pacote seja transmitido, a estação avisa sobre a transmissão e em quanto tempo ela irá realizar a tarefa (FOROUZAN, 2008).

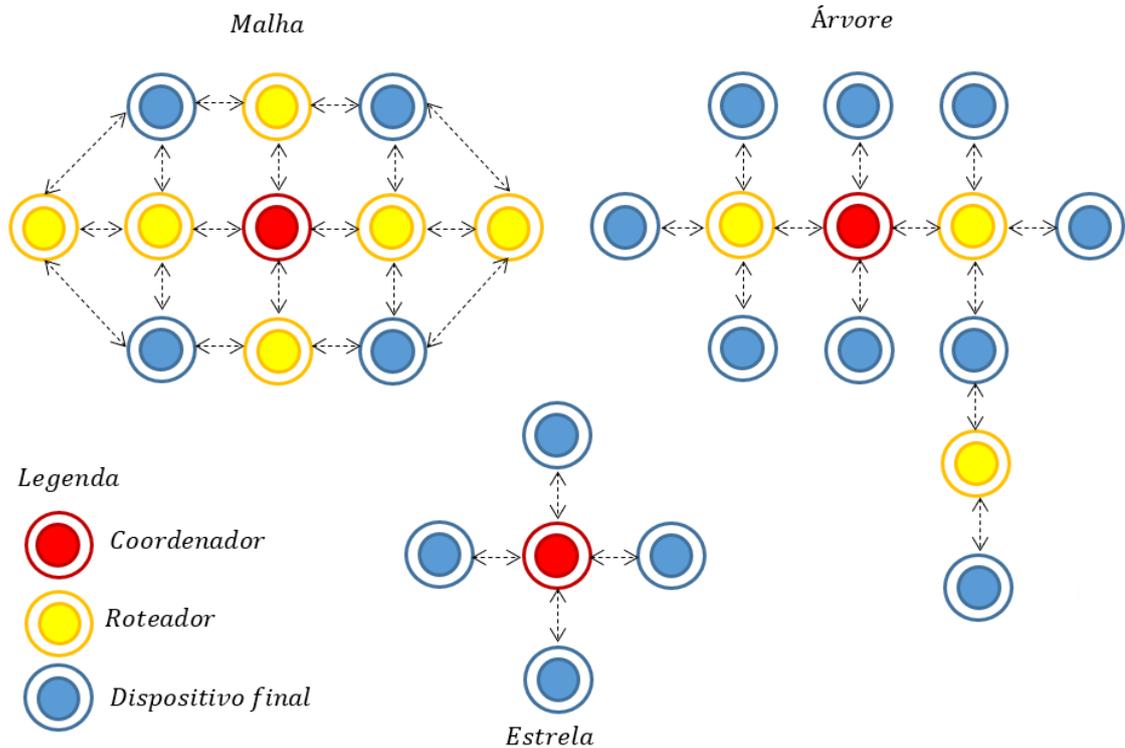


Figura 1 - Possíveis diferentes tipos de topologias para uma rede LR-WPAN, baseado em (SADIKIN; DEURSEN; KUMAR, 2020) e (FALUDI, 2011).

compatíveis com esta tecnologia, além da fácil integração à infraestruturas existentes (HIERTZ et al., 2010). Segundo (MILLÁN; VARGAS; MOLANO FERNANDO, 2011), o protocolo Wi-Fi IEEE 802.11 não foi originalmente concebido para aplicações em redes de automação sem fio, mas tem-se observado que o mesmo oferece algumas funcionalidades que o torna interessante, como a capacidade de transmissão de grande volume de dados, sobretudo quando os mesmos são enviados de diferentes pontos. Por conta disso, tem-se algumas propostas, como a de (ŞEN; KUL, 2017), onde emprega-se este protocolo em um sistema de supervisão de motores de indução, e a de (SARNIN et al., 2020), em um sistema de monitoramento de possíveis vazamentos de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

1.2.1 ZigBee

O ZigBee é um padrão de comunicação sem fio desenvolvido pela ZigBee Alliance e que teve como base para a sua elaboração o protocolo IEEE 802.15.4. Esse padrão possibilita a formação de redes com as mais variadas topologias, o que lhe garante grande flexibilidade de aplicação, principalmente na área de sensoriamento remoto, com baixo nível de consumo de energia (LEE; CHUANG; SHEN, 2009).

Nos últimos anos tem-se observado um crescimento considerável de estudos e

aplicações de redes de sensores sem fio, inclusive em aplicações industriais. No estudo desenvolvido por (GUTIÉRREZ et al., 2019), por exemplo, os autores buscam aplicar as tecnologias da Indústria 4.0 no monitoramento de motores elétricos de indução, em benefício de boas práticas de manutenção. Para tanto, é proposto o emprego de sensores de corrente elétrica enviando os valores mensurados por uma rede sem fio usando o ZigBee. Com esse monitoramento contínuo, consegue-se aumentar de modo considerável a confiabilidade da planta como um todo.

Uma rede ZigBee é formada basicamente por dois tipos de dispositivos: os *full function devices* (FFD) e os *reduced function devices* (RFD). Os dispositivos FFD são aqueles que possuem a pilha de instruções completa em sua memória e podem funcionar em qualquer topologia, podendo desempenhar funções de coordenador, de roteador ou até mesmo de dispositivo final. Dessa maneira, tratam-se de dispositivos capazes de permitir a entrada de módulos na rede formada e que necessitam de uma fonte alimentação ininterrupta com maior capacidade. Já os dispositivos RFD são de função limitada, uma vez que apenas parte do conjunto de instruções está carregada em suas memórias. Desse modo, esses dispositivos só podem se comunicar com dispositivos FFD e uma simples bateria pode servir como fonte de alimentação.

A rede ZigBee pode ser configurada para operar nas topologias estrela ou *peer-to-peer*. Para a primeira opção, cada dispositivo final comunica-se diretamente com o coordenador, não existindo a figura do roteador. Trata-se de uma topologia simples e um tanto limitada. Agora, na topologia *peer-to-peer* cada elemento se comunica com o dispositivo FFD mais próximo. Ainda, nesse tipo de rede, existem um coordenador e um roteador, ambos FFD. No mais, dependendo da organização dos dispositivos da rede formada, a topologia *peer-to-peer* pode ser do tipo malha ou árvore.

Os dispositivos ZigBee utilizam a frequência na faixa ISM, não sendo, portanto, necessária licença para funcionamento na maioria dos países. Estão inclusas nessa faixa as frequências de 2,4 GHz (Global), 915 MHz (América) e 868 MHz (Europa), com taxas de 250 kbps possuindo 16 canais, 40 kbps contendo 10 canais e 20 kbps dispondo de 1 canal. Entretanto, o fato de o ZigBee não necessitar licença para operar não exclui a obrigação de ter todos os seus dispositivos homologados pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL (RAMOS, 2012).

Por fim, pode-se pontuar como vantagens desse protocolo a característica determinística, a robustez, o baixo consumo e o baixo custo que os dispositivos apresentam. Por outro lado, como desvantagens, tem-se a limitação de distância e a questão do coordenador ser um possível ponto de falha, além da baixa segurança no tráfego das informações (LUGLI; SANTOS, 2013).

1.2.2 WirelessHART

O WirelessHART é uma extensão protocolo de comunicação HART (*Highway Addressable Remote Transducer*), com o objetivo de fornecer meios para a formação de uma rede de controle e monitoramento de processos, utilizando o padrão IEEE 802.15.4 como base. Assim, as funcionalidades e recursos adicionais permitiram a comunicação sem fio, mantendo a compatibilidade com os dispositivos e ferramentas já existentes para o HART.

Segundo (SONG et al., 2008), o WirelessHART foi o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio concebido especificadamente para monitoramento de processos e controle. Operando na faixa de 2,4 GHz, com canais numerados de 11 a 26, em intervalos de 5 MHz entre dois canais adjacentes, ele utiliza a faixa ISM, com taxas de transmissão de até 250 kbps. Além disso, no momento de sincronização de dados em sua camada de enlace, é definido um rigoroso tempo de 10 ms, além de utilizar a tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*), de modo a propiciar uma comunicação livre de colisão e com característica determinística (CHEN; NIXON; MOK, 2010).

Apresentando-se como uma alternativa às tradicionais redes cabeadas, essa opção de tecnologia oferece redução nos custos de cabeamento, comissionamento e manutenção. Entretanto, questões antes não encontradas nas tradicionais redes cabeadas passam a surgir, como os atrasos de comunicação e a perda de pacotes. Conforme (CHUNG et al., 2016), a perda de pacotes pode gerar a degradação do controle, comprometer a sua performance e a integridade da planta. Desse modo, como proposta de mitigar esse fenômeno, os autores propõem o uso de filtros, acompanhados de um controlador do tipo PID para redes sem fio.

Já com relação aos atrasos de comunicação, Chung et al. (2016), investigam os efeitos dos mesmos em um sistema de controle que utiliza o WirelessHART. Pontuando algumas das principais causas dos atrasos, como, por exemplo, o tempo de conexão de um novo nó à rede, atraso interno inerente a um determinado dispositivo, a movimentação de um determinado nó, dentre outras, os pesquisadores, por meio de experimentos, mensuraram os atrasos e encontram impactos significantes em parâmetros de desempenho de controle, como um aumento significativo no percentual de ultrapassagem (*overshoot*), um prolongamento no tempo de assentamento e um aumento na taxa de erro da planta.

No trabalho de (KUMAR; RAY; KANDE, 2013), os autores discutem sobre os desafios de integrar os dispositivos WirelessHART a um ambiente industrial, focando em uma solução que dê suporte para soluções de problemas e que tenha uma manutenção eficiente. Já em (RERKRATN et al., 2018) é proposta a integração dessa tecnologia a Controladores Lógico-Programáveis (CLP) do fabricante Mitsubishi, onde, por meio de uma planta experimental, testes são efetuados e os resultados obtidos são apresentados de modo a servir como um guia para a aqueles que estejam interessados nessa combinação.

Seguindo a apresentação de trabalhos sobre o WirelessHART, Maass et al. (2018),

apresentam o desenvolvimento de um observador para um sistema de controle que utiliza esse padrão no fechamento da malha, considerando uma planta linear e delimitando um intervalo máximo de tempo de transmissão. Já em (HAN; MA; CHEN, 2019), os autores tratam de um ponto sensível e essencial para a expansão do uso da tecnologia sem fio: consumo de energia. Para tanto, é proposto um algoritmo de roteamento que visa otimizar o consumo de energia de uma rede WirelessHART e assim prolongar o tempo de vida da rede.

Conforme (ADRIANO; ROSARIO; RODRIGUES, 2018), uma rede de dispositivos WirelessHART é tipicamente conectada a um controlador industrial, podendo ser um CLP ou um DCS³ em conjunto com outro tipo de rede industrial, como a rede MODBUS, por exemplo. Além disso, eles ressaltam que a baixa latência e a característica determinística tornam possível a utilização desse padrão em ambientes industriais.

Uma rede que utiliza o WirelessHART pode ser composta por vários nós que podem operar como ponto de acesso ou roteador. Dessa forma, o sistema de controle detém a capacidade de acessar um ponto da rede por vários caminhos diferentes. Seu desenvolvimento buscou permitir o funcionamento dessa rede em ambientes sujeitos a interferências eletromagnéticas, através do uso de tecnologias como, rede em malha, canal de salto e sincronização de mensagens. Além disso, a rede pode ser configurada nas topologias malha, estrela ou rede de malha estrela, conforme Figura 2. No mais, a rede formada possui os três principais elementos apontados abaixo e também apresentados na Figura 2:

- Dispositivos de campo: são instrumentos e podem estar conectados ao processo ou a outros equipamentos da planta, podendo já ser WirelessHART ou HART puro, mas com um adaptador para WirelessHART.
- *Gateways*: possibilitam a comunicação entre esses instrumentos e os aplicativos de controle.
- Gerente de rede: responsável por formar a rede, programar a comunicação entre os instrumentos de campo, gerenciar as rotas de mensagens e monitorar estado da rede.

Outros equipamentos podem ser adicionados à rede, tais como: adaptadores de rede para conversão de rede cabeada para não cabeada, *Handhelds*⁴ e pontos de acesso

³ DCS - *Distributed Control System*, em português, Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). Corresponde em um arranjo onde uma série de equipamentos de controle digital são distribuídos ao longo de uma fábrica.

⁴ Trata-se de um dispositivo portátil utilizado para, dentre outras tarefas, calibrar ou configurar um instrumento.

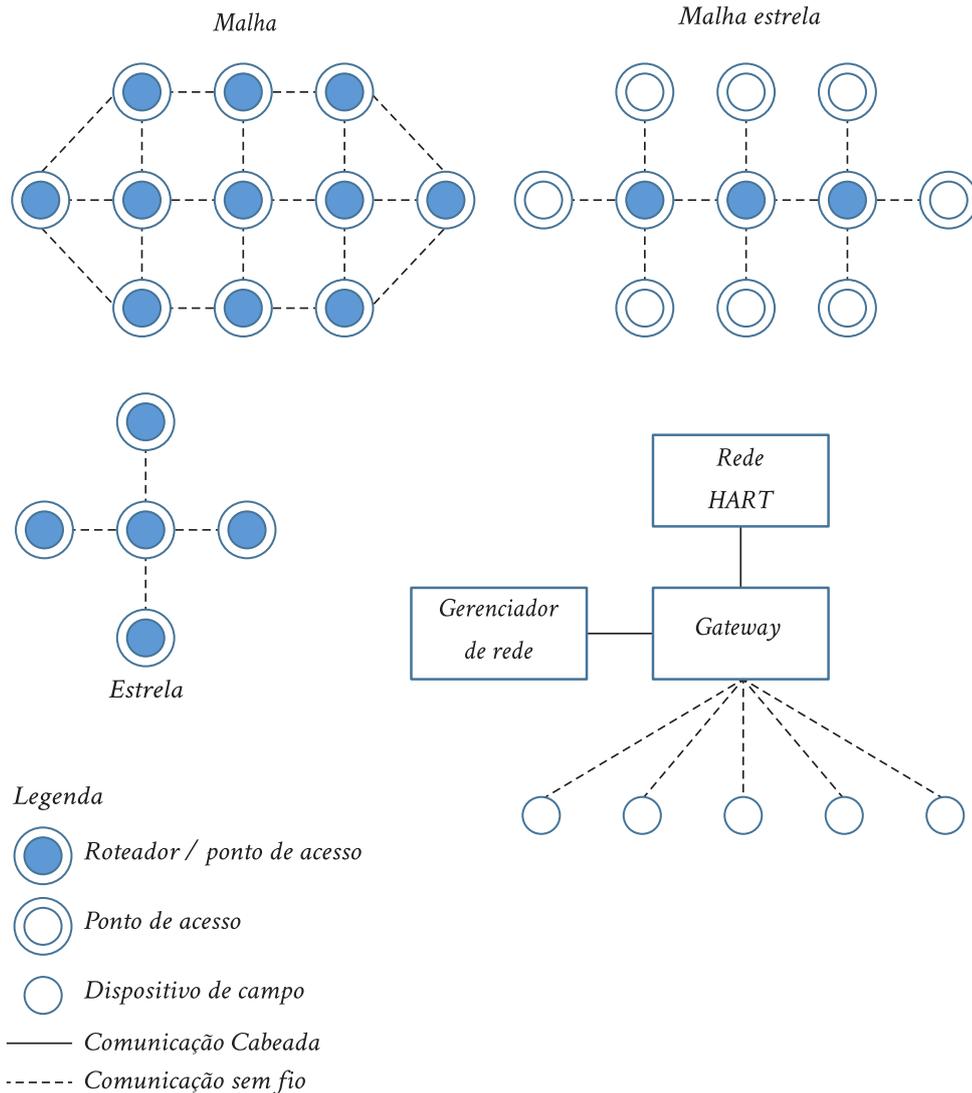


Figura 2 - Topologias e principais elementos previstos para o WirelessHART, baseado em (LUGLI; SANTOS, 2013).

dos módulos de campo ao *gateway*.

Por fim, como bem destacado por (LUGLI; SANTOS, 2013), as principais vantagens na utilização desse protocolo são: determinismo, robustez, segurança, possibilidade de conexão de outros protocolos industriais e o baixo consumo de energia. Por outro lado, como desvantagens, são apontadas: apenas a possibilidade de aplicação em automação de processos, por meio de rede cabeada HART, e a pouca disponibilidade de instrumentos para áreas classificadas⁵.

⁵ Conforme a Norma Regulamentadora de número 20 (NR-20), uma área classificada é um local sujeito a probabilidade de formação de atmosfera explosiva, por conter substâncias como gases/líquidos inflamáveis e poeiras/fibras combustíveis.

1.2.3 Wi-Fi IEEE 802.11

O Wi-Fi IEEE 802.11, ou simplesmente Wi-Fi, é um padrão de rede local sem fios (em inglês, WLAN - *Wireless Local Area Network*) comumente empregado em vários tipos de ambientes, como escritórios, residências, indústrias, dentre outros (QURESHI; ABDULLAH, 2014). De fato, praticamente todos os computadores portáteis e muitos outros dispositivos, como *smartphones* já saem de fábrica com o *hardware* necessário para o padrão Wi-Fi (802.11b, a, g ou n) (LUGLI; SANTOS, 2013), o que favorece em muito a sua disseminação.

Uma típica rede WLAN consiste em um ponto de acesso (AP)⁶, no meio ou ao centro de várias estações conectadas a este ponto. Existe ainda a possibilidade de comunicação descentralizada, ou seja, entre as estações. Portanto, este tipo de rede suporta topologias do tipo estrela, malha ou árvore, podendo apresentar um raio de cobertura que varia entre 50 a 100 metros, a depender da versão do protocolo (BANERJI; CHOWDHURY, 2013). Além disso, o Wi-Fi usa as bandas ISM de 2,4 e 5 GHz, com taxas de transmissão de dados que se iniciam na ordem de 1 Mbps, chegando a até alguns Gigabytes por segundo e consumo de energia moderado (VARSHNEY, 2003), (QURESHI; ABDULLAH, 2014) e (SILVANI et al., 2022).

Ao combinar este protocolo com o UDP⁷, por exemplo, consegue-se de forma mais rápida e descomplicada enviar dados pela rede, com a penalidade de não haver a garantia de que os pacotes cheguem ao seu destino na ordem correta ou que se quer cheguem. Por outro lado, na comunicação orientada à conexão, ou seja, no modo TCP⁸, tais garantias se tornam presentes (FOROUZAN, 2008).

Conforme (LUGLI; SANTOS, 2013), as principais vantagens deste protocolo são a possibilidade de integração com redes de tecnologia da informação (TI), a alta capacidade de envio e recebimento de dados e as elevadas taxas de transmissão. Por outro lado, este protocolo insere na rede uma característica não determinística, a possibilidade de colisão de dados e o consumo de energia que pode ser considerado elevado, se comparado a outras tecnologias, como o ZigBee, por exemplo.

⁶ Do inglês, *Access Point*.

⁷ Do inglês, *User Datagram Protocol*, em português Protocolo de Datagramas do Usuário.

⁸ *Transmission Control Protocol*, em português Protocolo de Controle de Transmissão.

1.2.4 ISA100.11a

O ISA-100.11a é um padrão de rede sem fio industrial baseado no IEEE 802.15.4 e que foi desenvolvido pela comissão da SP100, formada em 2005 pela ISA (*International Society of Automation*). Esse padrão foi desenvolvido especificadamente para o ambiente industrial, com suporte no topo de sua camada de aplicação para os principais protocolos já empregados pela indústria: HART, PROFIBUS, Fieldbus (LUGLI; SANTOS, 2013). Assim, pode-se resumir que seus principais objetivos são (RIEGO, 2009):

- Garantir o baixo consumo de energia;
- Garantir que as redes implementadas tenham restrições no que diz respeito ao tempo de latência;
- Definir uma infraestrutura, interfaces, aplicações, segurança e requisitos de gerenciamento de rede que sejam funcionais;
- Garantir robustez nas comunicações em ambientes sujeitos a interferências, algo típico em um ambiente industrial;
- Garantir a interoperabilidade entre os dispositivos, para que dispositivos de diversos fabricantes possam operar na mesma rede.

Uma rede ISA-100.11a é composta pelos seguintes elementos: gerente de rede, gerente de segurança, *gateway*, dispositivo de campo não roteador, dispositivo de campo roteador *backbone*, dispositivo de campo roteador e dispositivo portátil. Além disso, esse padrão suporta as seguintes topologias de rede: estrela, malha ou a combinação dos dois tipos (*sky mesh*) (REZHA; SHIN, 2014) e (FLORÊNCIO, 2015). Segundo (MOURA; BARRO, 2016), a topologia *sky mesh* reduz a complexidade de instalação, aumenta a confiabilidade e a disponibilidade da rede.

No que tange à segurança da rede, o protocolo ISA-100.11a utiliza o sistema AES (*Advanced Encryption Standard*) para a criptografia e a verificação de integridade. Trata-se de um sistema não só empregado em redes sem fio, mas universalmente em troca de dados entre insituições financeiras, lojas de *e-commerce*, por exemplo. Ainda, o AES é o primeiro sistema de criptografia publicamente aberto e acessível aprovado pela Agência de Segurança Nacional (NSA) para tratar informações secretas (MOURA; BARRO, 2016).

Por fim, como descrito por (LUGLI; SANTOS, 2013), o padrão ISA ainda tem alguns pontos a ser definidos. Entretanto, com os estudos já executados até aqui, espera-se um protocolo que tenha como características positivas o determinismo, a robustez, a segurança, a possibilidade de conexão com outros protocolos e o baixo consumo de energia.

1.3 Atrasos de Comunicação em Redes de Automação

Segundo (PENG et al., 2009), os atrasos de comunicação têm características que são variantes no tempo, além do poder de degradar significativamente o desempenho do controle. Assim, muitos estudos têm sido desenvolvidos de modo a propor uma solução para esse problema. No trabalho desenvolvido por (OSUNA-IBARRA; BARRAGAN; LOUKIANOV, 2020), por exemplo, os autores relatam que os atrasos, quando não tratados, podem comprometer o funcionamento do controlador ou até mesmo desestabilizar o sistema. Desse modo, é proposto o uso de um filtro preditor próprio para sistemas não-lineares que visa compensar o atraso de medição dos sensores, fazendo com que o sistema possa operar em malha fechada sem atraso.

De acordo com (LIAN; MOYNE; TILBURY, 2001), os atrasos totais encontrados em uma rede de automação podem ser divididos em: tempo de pré-processamento (T_{pre}), tempo de espera (T_{wait}) e tempo de pós-processamento (T_{post}). O primeiro tipo, T_{pre} , compreende no tempo necessário para o dispositivo transmissor obter os dados do sensor e prepará-los para o envio pela rede. Já o T_{wait} trata-se do tempo necessário para que o dispositivo receba a permissão para acessar a rede de comunicação e por ela poder transmitir. Por fim, T_{post} compreende no tempo necessário para que o receptor decodifique e processe a mensagem recebida (MICHELIN, 2014).

Um parâmetro que também afeta o comportamento e a estabilidade de uma rede de automação é o tempo de amostragem (GODOY; PORTO; INAMASU, 2010). A rede deve ser capaz de amostrar e transmitir dados dentro de um mesmo intervalo, sem que haja comprometimento do funcionamento da mesma. Por outro lado, se o período de amostragem adotado for muito maior que a largura de banda disponível, a rede ficará sobrecarregada, acarretando em atrasos adicionais, *jitter*, perda de pacotes e erros na transmissão de mensagens (AL-DABBAGH; CHEN, 2016).

No artigo escrito por (XINRAN; CHAO; YINGDUO, 2013), é tratado de redes de comunicação de controle empregada na área de distribuição de energia elétrica. Como bem ressaltado, o avanço da tecnologia tem permitido a ação de controlar, a longa distância diversos tipos de sistemas. Entretanto, esta aplicação insere novos problemas, como atrasos, perda de pacotes e desordenamento de pacotes. De forma a tratar especificadamente do impacto do atraso de comunicação em uma rede de automação, os autores descrevem a distribuição dos atrasos medidos em uma rede de controle do sistema de distribuição de uma companhia Chinesa, conforme Figura 3. Com essa medição, eles conseguem apontar qual foi o valor do maior intervalo de atraso obtido, neste caso, entre 60 *ms* a 80 *ms*. Assim, baseando-se nessa informação, a rede foi modelada considerando a presença de atrasos com características estocásticas. Em seguida, uma vez que o modelo havia sido validado, foram efetuadas simulações aplicando a técnica de controle ótimo no sistema em estudo.

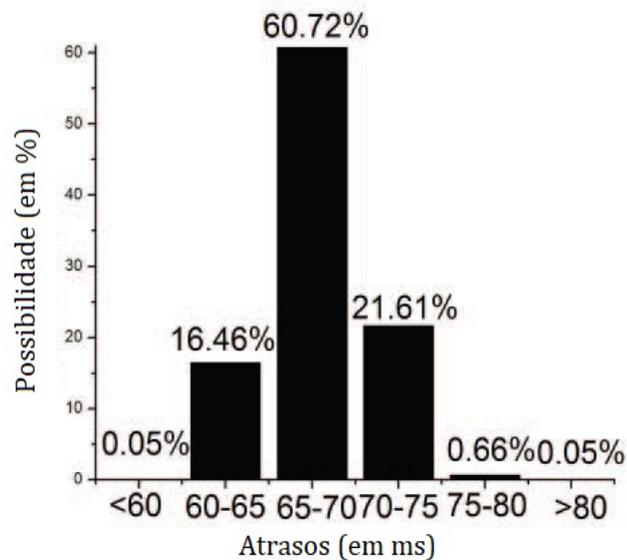


Figura 3 - Distribuição do atraso de comunicação. Fonte: (XINRAN; CHAO; YINGDUO, 2013), com adaptações.

Em (MA et al., 2011), os autores tratam de uma rede que pode apresentar múltiplos atrasos de comunicação. Na modelagem do problema, é considerada uma sequência de variáveis estocásticas que obedecem à distribuição de Bernolli, permitindo assim, que o modelo do sistema descreva aleatoriamente a coerência dos atrasos de comunicação. Como solução, os autores propõem a técnica de controle por modos deslizantes discreto, sendo esta capaz de fazer com que o sistema alcance a superfície de deslizamento e nela permaneça.

Os atrasos de transmissão associados a comunicação sem fio tem características randômicas, variando de tempos em tempos. Na transmissão sem fio, a média do tempo gasto para entregar um pacote é definido como atraso de transmissão ou latência, sendo o desvio padrão associado a esse valor denominado *jitter*. A latência é um requisito que pode variar conforme a aplicação da rede. Por exemplo, enquanto que em um dispositivo que use Sistema de Posicionamento Global (GPS) necessita de uma latência de 1 segundo a uma taxa de amostragem de 1 Hz, uma rede de controle sem fio deve ter uma latência menor que $50 \mu s$ para uma taxa de amostragem de 1 kHz (ZAHMATI; FERNANDO; KOJORI, 2011).

Segundo Moyne e Tilbury (2007), o *jitter* é uma questão comumente atrelada ao *hardware* escolhido e ao *software* desenvolvido pelo programador. Investigar o *jitter* em uma rede de automação sem fio é um ponto importante, pois é uma maneira de garantir que os atrasos de transmissão estarão dentro de limites máximo e mínimo pré-definidos. Dessa forma, a performance do controlador não fica comprometida e o sistema não entra em uma dinâmica oscilatória ou até mesmo vá para a instabilidade.

No trabalho de (GODOY; SCORZONI; PORTO, 2012), é utilizada a comunicação serial RS-232 e um dispositivo ZigBee para avaliar o desempenho desse tipo de comunicação no controle de um motor. Dentre os itens investigados pelos pesquisadores, estão o *jitter*, os atrasos de comunicação e a perda de pacote de dados. Em determinada parte do experimento, os autores montaram um histograma com os atrasos mensurados, considerando, para tanto, uma distância entre transmissor e receptor de 10 metros. Como se pode acompanhar na Figura 4, a maioria dos valores estão próximos do valor médio de 27,38 ms. Observa-se, ainda, que não há a presença de grandes valores discrepantes, o que, segundo os autores, significa um bom determinismo.

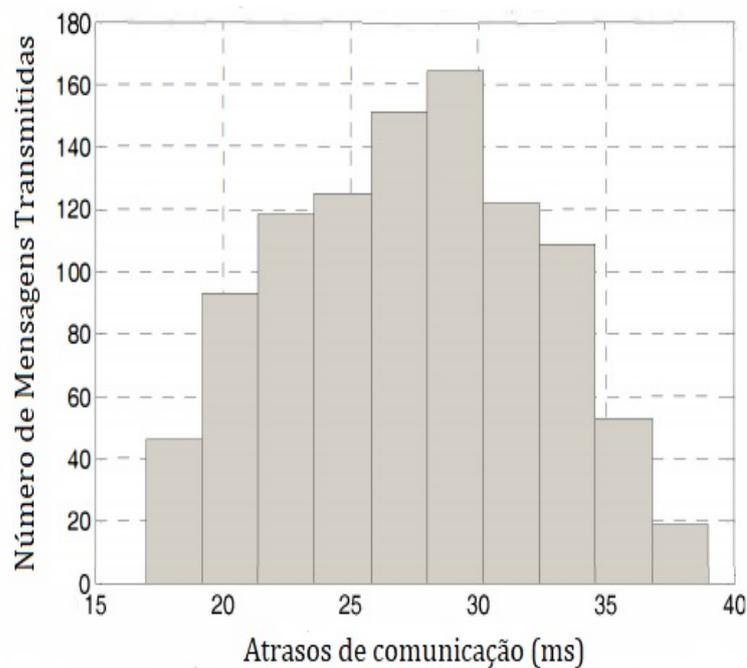


Figura 4 - Atrasos de comunicação em uma rede ZigBee. Fonte: (GODOY; SCORZONI; PORTO, 2012), com adaptações.

Em uma segunda avaliação a respeito do funcionamento do ZigBee executada por Godoy, Scorzoni e Porto (2012), os pesquisadores executaram testes para as distâncias de 5, 10 e 20 metros. Conforme dados apresentados na Tabela 1, o valor médio do atraso está entorno de 14 ms e o *jitter* em 2,5 ms.

Outro fato interessante observado por Godoy, Scorzoni e Porto (2012) é que, para valores maiores de distância, não houveram mudanças significativas no tempo de atraso e no *jitter* fora dos padrões apresentados na Tabela 1. Além disso, na última coluna, tem-se o percentual de perda de pacotes. Observa-se que em todos os casos o resultado foi zero. A mesma conclusão foi obtida para valores maiores que 20 metros. Desse modo, eles comprovaram, experimentalmente, a confiabilidade do protocolo ZigBee.

Tabela 1 - Comportamento do protocolo ZigBee para diferentes distâncias. Fonte: (GODOY; SCORZONI; PORTO, 2012).

Distância (m)	Atraso (ms)	<i>Jitter</i> (ms)	Perda de Pacotes (%)
5	14,2	2,5	0
10	14	2,46	0
20	14,12	2,48	0

Em (HASSAN et al., 2017), os autores afirmam que o uso da tecnologia sem fio, sobretudo em ambientes industriais, lançam certos desafios, como os atrasos estocásticos de comunicação e as atualizações não-periódicas de medições de campo enviadas por transmissores *wireless*. Em especial, o atraso estocástico é capaz não só de degradar o funcionamento da rede, bem como levar à perda de pacotes. Como nas indústrias em geral empregam-se com frequência controladores do tipo PID, estes são bem sensíveis a longos atrasos e incertezas, além de possuírem um intervalo de ganho de estabilização pequeno.

As fontes causadoras de atrasos em uma rede de automação sem fio podem ser classificadas em três tipos (HASSAN et al., 2017):

- (a) Tempo morto do processo;
- (b) Atraso por processamento de dados pelo controlado;
- (c) Atrasos induzidos pela rede de automação, que podem ser separados em dois subtipos:
 - i. atraso que se dá entre o controlador e o atuador, τ_{ca} ;
 - ii. atraso que se dá entre o sensor e o controlador, τ_{sc} .

De modo a avaliar o desempenho de uma rede WirelessHART participando no controle de um processo onde foi escolhido o controlador PID, Hassan et al. (2017) estudaram os efeitos dos atrasos estocásticos e propuseram como técnica de solução para esse problema, o uso de *setpoint* ponderados junto ao controlador PID. O experimento consistiu no uso de um nó, responsável por enviar dados do processo e por receber dados do controlador, de um ponto de acesso (AP), fazendo a ponte da rede sem fio com o *gateway* e, por sua vez esse fazendo a ligação com o computador.

Os pesquisadores dividiram os atrasos em dois tipos: o *downstream* (t_d), representando o tempo de atraso entre o *gateway* e o nó, e o *upstream* (t_u), indicando o atraso no caminho inverso. Para se obter os valores de t_d e t_u , foram usados *timestamps* nas mensagens enviadas. A diferença entre os *timestamps* recebidos mas gerados pelo *gateway* e os

timestamps inseridos na mensagem enviada quando as mesmas chegaram ao seu destino é que compuseram o cálculo dos atrasos.

Na Figura 5 segue um esquemático do experimento executado por Hassan et al. (2017). Já na Figura 6 tem-se dois gráficos que foram frutos de medições obtidas experimentalmente, conforme esquemático representado na Na Figura 5. No primeiro gráfico estão os atrasos de *upstream* (t_u) e no segundo os de *downstream* (t_d). Para os (t_u), o valor médio obtido experimentalmente ficou em torno de 2,145 s, tendo sido encontrado um valor máximo para o atraso de 1,770 s e mínimo de 1,181 s. Já para (t_d), conforme mostrado no gráfico, o mesmo teve comportamento constante e igual a 1,280 s.

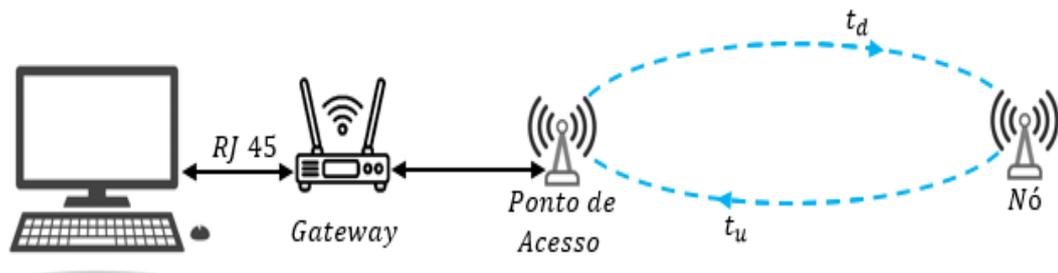


Figura 5 - Esquemático da rede WirelessHART usada no experimento.

Fonte: (HASSAN et al., 2017), com adaptações.

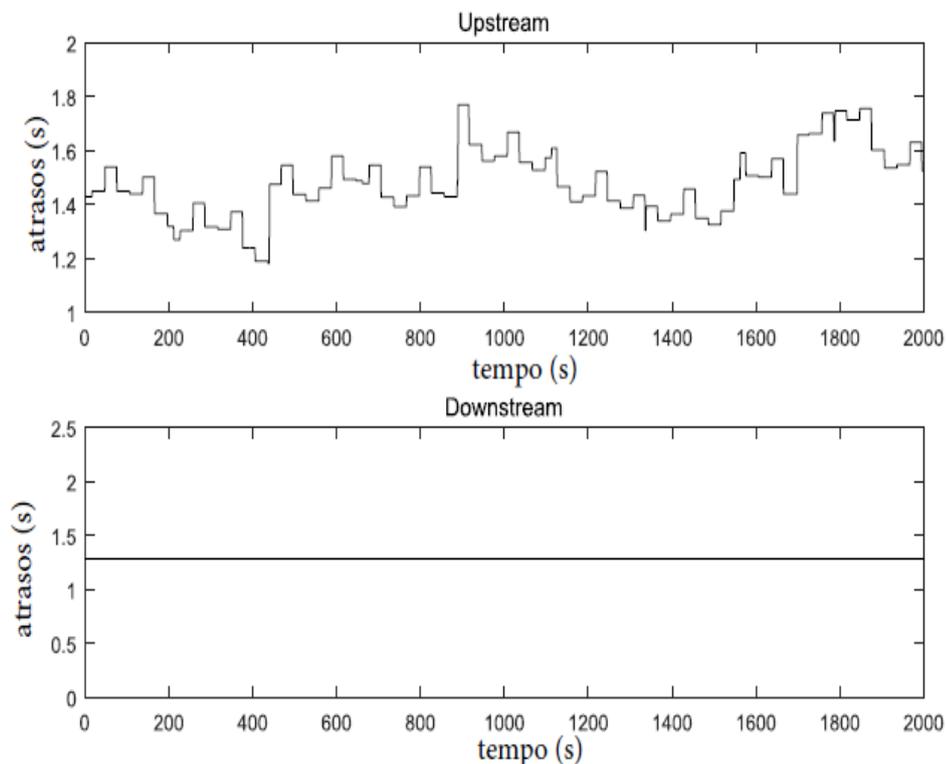


Figura 6 - Atrasos obtidos durante o experimento. Fonte: (HASSAN et al., 2017).

A Figura 7 apresenta por meio de diagrama de blocos, um sistema de controle por rede sem fio. Conforme pode-se observar, a saída da planta corresponde ao sinais que são mensurados pelos sensores nela instalados. Estes sinais são convertidos da forma analógica para digital. Já em sua forma digital, a informação é transmitida até o controlador, o qual irá determinar o valor do sinal de controle baseado nas informações recebidas dos sensores. O projeto do controlador pode ser em tempo discreto ou em tempo contínuo. Em seguida, o sinal de controle é transmitido e antes de chegar ao atuador, o mesmo é convertido de digital para analógico. Observe que os atrasos induzidos pela rede estão indicados por τ_{ca} e τ_{sc} (GAUTAM et al., 2021).

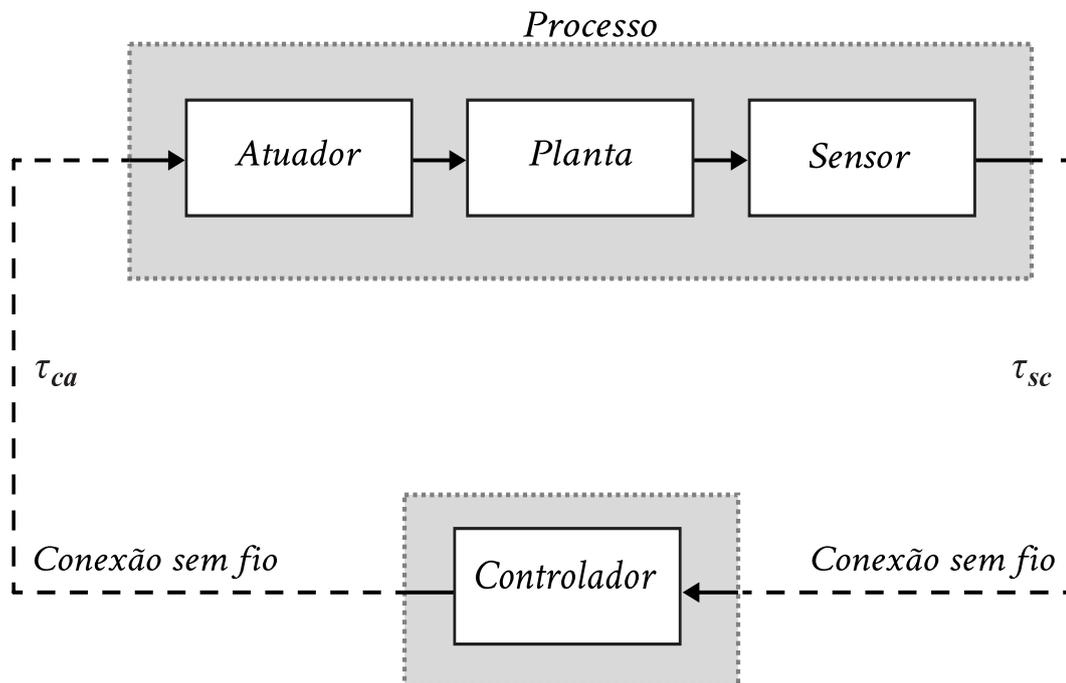


Figura 7 - Representação de um sistema de controle por rede de automação, baseado em (GAUTAM et al., 2021).

De acordo com (SHAH; MEHTA, 2018b), o uso de redes de comunicação em um sistema de controle leva a algumas questões relevantes e que são apontadas a seguir:

- (a) **Atrasos de comunicação:** correspondem ao tempo necessário para que os dados trafeguem pela rede.
- (b) **Perda de pacotes:** ocorre quando o dado ao ser transmitido acaba não chegando ao seu destino final. Uma das principais causas para a perda de pacotes é o congestionamento da rede.
- (c) **Desordenamento de pacotes:** o desordenamento de pacotes ocorre com mais frequência em redes sem fio, sobretudo em situações de intenso tráfego, congestionamento ou *jitter*. Nas redes sem fio, geralmente os dados são divididos em pequenos

pacotes. Para dar mais segurança à transmissão, cada pacote recebe um identificador, que será utilizado no momento de “reconstruir” a informação. Em alguns casos, ou um pacote não é entregue ou não em sequência, o que pode afetar o desempenho do sistema em malha fechada.

- (d) **Compartilhamento de banda:** é um problema que aparece em estruturas de rede estruturada e também hierárquica. Em ambas estruturas, há a possibilidade de conexão de muitos elementos, como sensores, atuadores, a planta. Todavia, a medida que há um aumento no número de elementos na rede, há igualmente um aumento no compartilhamento de banda, o que pode impactar em redução de velocidade da rede, por exemplo, além provocar congestionamento e *jitter*.
- (e) **Segurança:** trata-se de uma das maiores preocupações em se tratando de sistemas de controle via redes, sobretudo quando se trata de uma rede sem fio. Por isso, adotar meios de tornar a rede mais segura e imune a invasores torna-se uma ação imperiosa.

2 CONTROLE COM ESTRUTURA VARIÁVEL POR MODO DESLIZANTE

A técnica de Controle com Estrutura Variável por Modo Deslizante (VSC/SMC) tem como principal característica uma lei de controle por realimentação de chaveamento em alta velocidade. O objetivo desse chaveamento é trazer a trajetória dos estados do sistema até uma superfície denominada de superfície de deslizamento e nela fazer com que eles permaneçam, até que seja alcançado o ponto de equilíbrio. Portanto, o VSC/SMC é método de controle não-linear que altera a dinâmica do sistema através da aplicação de um sinal de controle chaveado e em alta frequência, produzindo um novo sistema (EDWARDS; SPURGEON, 1998).

A superfície de deslizamento (em inglês, *sliding* ou *switching surface*) é projetada de forma que o sistema passe a ter o desempenho desejável e que seja imune a perturbações. Uma vez alcançada a superfície, diz-se que o sistema está na condição de deslizamento ou em modo deslizante, funcionando idealmente como um controlador de ganho infinito (UTKIN; GULDNER; SHI, 1999) e (LIU, 2017).

Basicamente, o projeto de um VSC/SMC se divide em duas etapas (EDWARDS; SPURGEON, 1998):

1. Projeto de uma superfície de deslizamento de modo que a dinâmica da planta tenha uma trajetória desejada, quando a mesma estiver em modo deslizante;
2. Desenvolvimento de uma lei de controle que atenda as condições de existência do modo deslizante e faça com que a planta atinja da superfície de deslizamento.

Assim, com base no que foi exposto nos itens (1) e (2), a existência de um modo deslizante (SM) impõe a necessidade de estabilidade da trajetória do estado para a superfície de deslizamento. Por isso, a lei de controle deve ser chaveada para assegurar que o estado não só alcance a superfície de deslizamento, bem como nela permaneça durante todo o tempo subsequente (DECARLO; ŽAK; MATTHEWS, 1988). Uma vez alcançada a superfície e nela permanecendo, ou seja, atendendo ao critério da alcançabilidade, consegue-se a desejável robustez a incertezas e eventuais distúrbios (HAMAYUN; EDWARDS; ALWI, 2016).

Nos últimos anos, tem-se observado um incremento nos mais variados tipos de aplicação desta técnica de controle. Na área de manipuladores robóticos, por exemplo, em (PARRA-VEGA; HIRZINGER, 2000), o controlador projetado garante a convergência do manipulador para a posição desejada em tempo finito. Já em (HUANG et al., 2005), os autores aplicam uma técnica de suavização do controle por modos deslizantes em um manipulador com juntas flexíveis.

Os veículos autônomos não tripulados, quer sejam aéreos, terrestres ou aquático também são outros exemplos de aplicação. Em (ABHINAV; MIJA, 2021), os pesquisadores utilizam o controle por modo deslizante junto com observador de estado para controlar um helicóptero não tripulado com 3 graus de liberdade. Já no trabalho de (TAGNE; TALJ; CHARARA, 2013), tem-se o projeto de um controlador por modo deslizante de ordem superior para um veículo autônomo. Por fim, em (CRISTI; PAPOULIAS; HEALEY, 1990) esta técnica é aplicada no controle de um veículo autônomo subaquático (*Autonomous Underwater Vehicle - AUV*).

Em se tratando de situações de defesa, Ramos (2019) aborda o uso de SMC em um robô móvel de vigilância. Em (ZHANG et al., 2021) é tratado o uso de controle por modo deslizante combinado com lógica *Fuzzy* em um veículo militar não tripulado. Ainda, em (NIE et al., 2018) é proposto um SMC adaptativo para o controle do posicionador servo-hidráulico do sistema de elevação e estabilização de uma plataforma de artilharia. Além disso, Hills e Yoerger (1994) apresentam o uso desta técnica de controle em um veículo subaquático não tripulado (*Unmanned Undersea Vehicle - UUV*) da Marinha dos Estados Unidos da América.

Na área médica, Fatoorehchi e Ghorbanian (2019) descrevem o emprego de um controlador por modo deslizante de primeira ordem para rastrear dados de um eletrocardiograma do coração humano. Em (DANSA; RODRIGUES; OLIVEIRA, 2019), essa técnica é empregada no controle de um pâncreas humano artificial bi-hormonal, com o objetivo de garantir a regulação da glicemia em pacientes com diabetes do tipo 1. Já em (ISLAM et al., 2020), o uso do duplo integral SMC é proposto para o tratamento de pacientes com Leucemia.

Em se tratando de controle de processos, Chiu, Ouyang e Ku (2012) e Barambones (2012) propõem o uso do SMC para se obter ganhos máximos de geração de energia solar fotovoltaica e eólica, respectivamente. Em (ZHAO; LIANG; SPURGEON, 2018), um controlador por modo deslizante robusto e adaptativo é proposto para o controle dinâmico do posicionamento de uma plataforma de petróleo semi-submersível. No trabalho de (MA; ZHAO; SPURGEON, 2018), os autores propõem o emprego do SMC discreto para o controle de um tanque de um reator com agitador, equipamento esse muito empregado na indústria química em geral. Por fim, em (LI; NIU, 2019), (SHAH et al., 2021) e (ZHOU; WANG; LIANG, 2021), os pesquisadores apontam para o uso do controle por modo deslizante em sistemas de controle que utilizam redes de automação sujeitas, dentre outras coisas, a perdas de pacotes, atrasos aleatórios e quantização dos sinais.

2.1 Controle por Modo Deslizante em Tempo Contínuo

2.1.1 Formulação do Problema

Considere uma classe de sistemas não-lineares no vetor de estado $x(t)$ e linear no vetor controle $u(t)$, da forma:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, t, u) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}) + \mathbf{B}(t, \mathbf{x})u(t) \quad (1)$$

onde $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^l$, $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) \in \mathfrak{R}^n$, $\mathbf{B}(t, \mathbf{x}) \in \mathfrak{R}^{n \times l}$ e os elementos $\mathbf{f}(t, \mathbf{x})$ e $\mathbf{B}(t, \mathbf{x})$ são assumidos como sendo contínuos, com derivadas contínuas e limitadas em relação a \mathbf{x} e t .

2.1.2 A Superfície de Deslizamento

A superfície de deslizamento $\sigma(\mathbf{x}(t)) = 0$ é um espaço $(n - l)$ dimensional em \mathfrak{R}^n , determinado pela intersecção de l superfícies de chaveamento de dimensão $(n - l)$, onde se garante que o sistema tenha um comportamento predefinido e estável.

Seja a superfície de deslizamento dada por:

$$\sigma(\mathbf{x}(t)) = S\mathbf{x}(t) = 0 \quad (2)$$

onde $S \in \mathfrak{R}^{n \times l}$ corresponde à matriz da superfície de deslizamento.

Para cada entrada $u_i(t)$ do controle chaveado $u(t)$, tem-se a seguinte forma:

$$u_i(t, x) = \begin{cases} u_i^+(t, \mathbf{x}) & \text{se } \sigma_i(\mathbf{x}(t)) > 0 \\ u_i^-(t, \mathbf{x}) & \text{se } \sigma_i(\mathbf{x}(t)) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

para $i = 1, \dots, l$. Ainda, o termo $\sigma_i(\mathbf{x}(t))$ define a i -ésima superfície de chaveamento associada à superfície (2).

2.1.2.1 Modo Deslizante

Dado que a superfície de deslizamento já foi projetada, o próximo passo é garantir que exista um modo deslizante. Para tanto, para assegurar a sua existência, na vizinhança a superfície de deslizamento $\sigma(\mathbf{x}(t)) = 0$, a tangente ou o vetor velocidade da trajetória do estado deve sempre estar direcionado para a superfície de deslizamento. Portanto, se a trajetória do estado intercepta a superfície de deslizamento, o valor da trajetória do estado se manterá dentro de uma vizinhança ϵ de $\sigma(\mathbf{x}(t)) = 0$.

Um ponto importante é que o modo deslizante não precisa existir na i -ésima superfície de deslizamento $\sigma(x_i(t)) = 0$ separadamente. Todavia, sua existência deve ser

garantida na intersecção de todas as superfícies, conforme Figura 8, onde é apresentado um exemplo de situação onde o modo deslizante somente existe na intersecção de duas superfícies de deslizamento. Uma conclusão importante sobre este fato, é que o modo deslizante não pode ocorrer sobre superfícies que são descontínuas, mas sim dentro de uma camada limite (UTKIN, 1978).

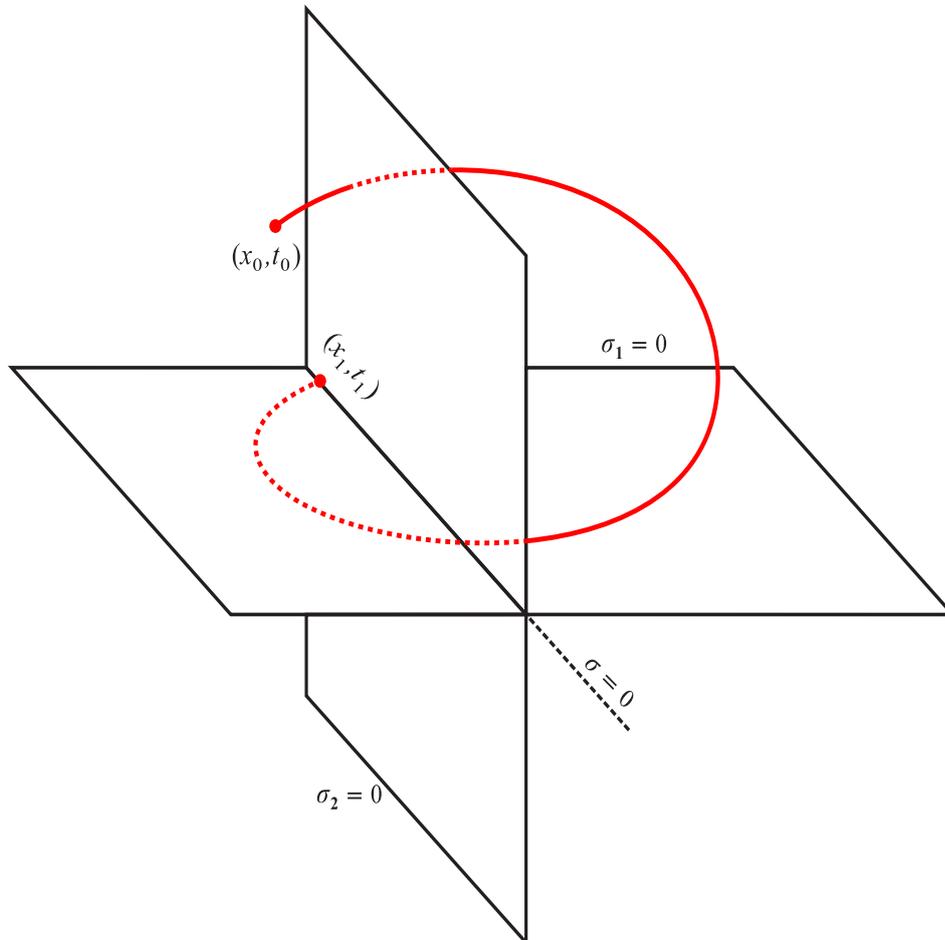


Figura 8 - Modo deslizante na intersecção de duas superfícies de deslizamento, baseado em (DECARLO; ŽAK; MATTHEWS, 1988).

2.1.2.2 Condição de Existência do Modo Deslizante

A condição necessária para que haja um modo deslizante, é que a trajetória que leva o estado à superfície de deslizamento seja estável $\sigma(\mathbf{x}(t)) = 0$ ou, no mínimo, para uma vizinhança dessa superfície. Desse modo, os estados devem aproximar-se assintoticamente da superfície. A maior vizinhança existente é denominada de região de atração. Geometricamente descrevendo, o vetor tangente ou a derivada no tempo do vetor de estados deverá apontar para a superfície de deslizamento na região de atração.

A questão da existência do modo deslizante é bem semelhante a um problema de estabilidade generalizada, onde o segundo método de Lyapunov estabelece um conjunto natural para a análise. Dessa forma, a estabilidade para a superfície de deslizamento requer a seleção de uma função de Lyapunov generalizada $V(\mathbf{x}, t)$, que é definida positiva e tem uma derivada negativa em relação ao tempo, na região de atração (DECARLO; ŽAK; MATTHEWS, 1988).

Definição 1: Um domínio D no espaço fechado $\sigma(\mathbf{x}(t)) = 0$ é um domínio de modo deslizante se para cada $\varepsilon > 0$, existe $\delta > 0$, tal que qualquer movimento iniciado dentro de uma vizinhança δ de dimensão n de D pode deixar a vizinhança ε de dimensão n de D somente através da vizinhança ε de dimensão n da fronteira de D , conforme Figura 9.

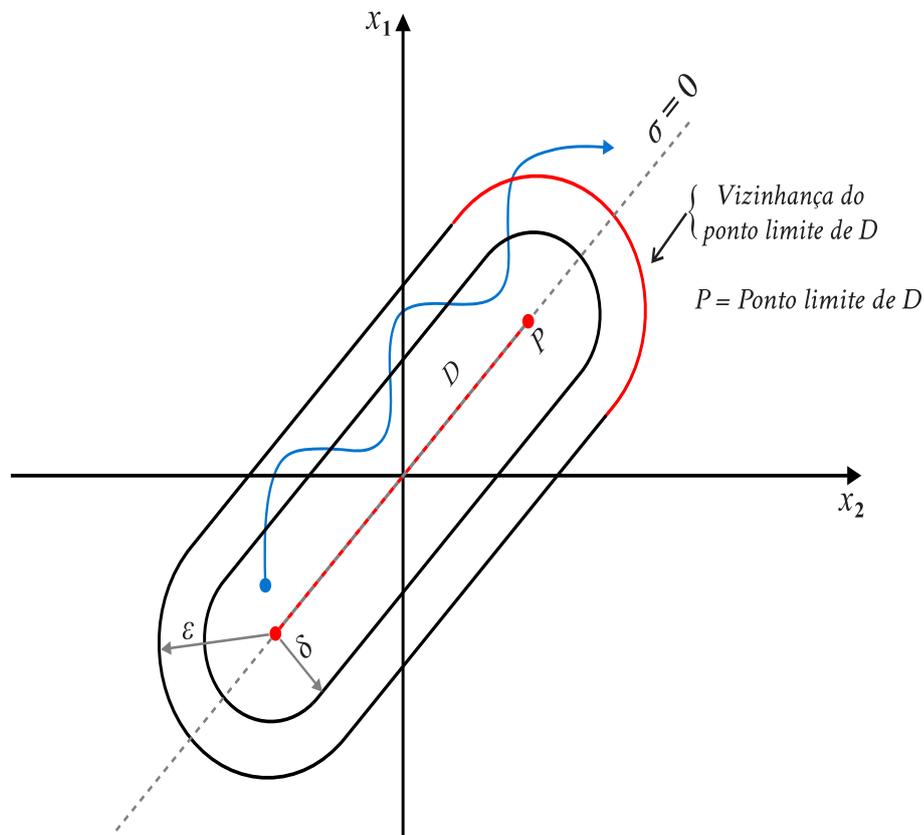


Figura 9 - Representação bidimensional do domínio do modo deslizante, baseado em (RIBEIRO, 2006).

Teorema 2.1. Para o domínio D de um modo deslizante é suficiente que, em certa região de $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ onde $D \subset \Omega$, exista uma função escalar diferenciável contínua $V : \mathbb{R}_+ \times \Omega \times \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}$ que satisfaça as seguintes condições (DECARLO; ŽAK; MATTHEWS, 1988):

1. $V(t, \mathbf{x}, \sigma)$ é definida positiva em relação à σ , ou seja, $V(t, \mathbf{x}, \sigma) > 0$ se $\sigma \neq 0 \forall \mathbf{x} \in \Omega$, e nas esferas $\|\sigma\| = r \forall \mathbf{x} \in \Omega$:

$$\begin{aligned} \inf_{\|\sigma\|=r} V(t, \mathbf{x}, \sigma) &= h_r \\ \sup_{\|\sigma\|=r} V(t, \mathbf{x}, \sigma) &= H_r > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

onde H_r e h_r dependem de r e $h_r > 0$ para $r \neq 0$.

2. A derivada $V(t, \mathbf{x}, \sigma)$ em relação ao tempo tem um supremo negativo para todo $x \in \Omega$, exceto nos pontos da superfície de deslizamento onde a ação de controle é indefinida e, por isso, a derivada de $V(t, \mathbf{x}, \sigma)$ não existe.

No caso em que o domínio de atração de um modo deslizante se trata de todo o espaço de estado, diz-se que este modo deslizante é globalmente alcançável. Quando essa condição não é verdadeira, o domínio é então um subconjunto do espaço de estados.

2.1.3 Lei de Controle

Uma vez projetada a superfície de deslizamento, a próxima etapa é elaborar uma lei de controle que obedeça às condições de existência do modo deslizante. Uma possível lei de controle é representada na forma:

$$u_{sw} = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (5)$$

onde $\eta > 0$ e $\operatorname{sgn}(\cdot)$ é a função sinal.

A lei apresentada em (5) permite que a superfície de deslizamento seja alcançada em uma constante de tempo η . Se η for muito pequena, o tempo necessário para alcançar a superfície de deslizamento será muito longo. Por outro lado, um valor muito grande para η tem como consequência um *chattering* severo (LIU; WANG, 2012).

2.1.4 Fenômeno do Chattering

Em condições ideais, um modo deslizante existe se, e somente se, a trajetória do estado $\mathbf{x}(t)$ da planta $\sigma(\mathbf{x}(t)) = 0$ para todo $t \geq t_0$, para algum t_0 . Por outro lado, em sistemas reais a função de chaveamento apresenta limitações e imperfeições, tais como retardamento, histerese, o efeito da amostragem no tempo, dentre outras. Assim, tais limitações acabam por forçar o chaveamento a ocorrer em uma frequência finita. Como consequência, a trajetória do estado tende a oscilar em uma vizinhança da superfície de deslizamento. A esse fenômeno dá-se o nome de *chattering*.

Na Figura 10 está representado um modo deslizante com a presença do *chattering*. Em condições ideais, ao alcançar a superfície, o estado nela permaneceria e os “*dentes*”

representados ao longo da curva $\sigma = 0$ não existiriam. A existência dessa “*trepidação*” é um efeito indesejado, dado que ela pode causar a instabilidade no controle, gerar perda de energia por aquecimento em circuitos elétricos, além de desgastes por vibrações, em se tratando de sistemas mecânicos (UTKIN; GULDNER; SHI, 1999) e (KUNUSCH; PULESTON; MAYOSKY, 2012).

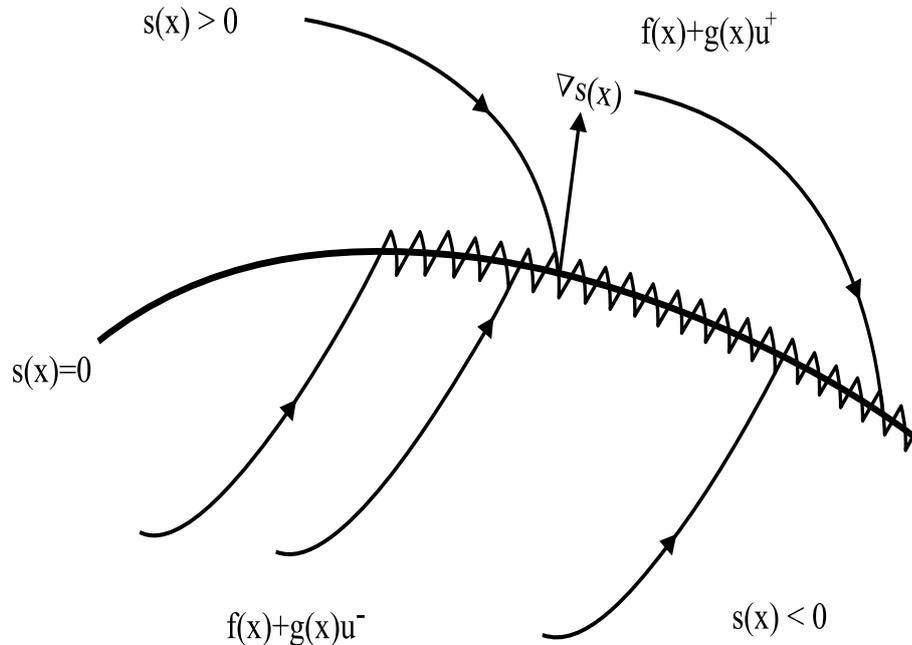


Figura 10 - Modo deslizante com *chattering*, baseado em (SHTESSEL et al., 2014).

Existem diversas abordagens onde se pode mitigar ou até mesmo eliminar a presença do *chattering*, dentre elas:

- A inserção de uma camada limite no controlador, permitindo que o estado do sistema não fique restrito a apenas à superfície de deslizamento, mas sim em uma vizinhança deste, conforme trabalho desenvolvido por (SLOTINE; SASTRI, 1983) e (SLOTINE, 1984).
- O emprego de um observador assintótico na malha de controle, com a finalidade de gerar um modo deslizante ideal, segundo (BONDAREV et al., 1985).
- A utilização de controladores em cascata, empregando a aproximação da forma regular, como proposto por Drakunov et al. (1990a) e Drakunov et al. (1990b), onde a ideia é projetar um controlador para gerar o sinal de controle desejado e um outro, de modo que o sinal de controle real (medido) seja igual ao desejado.
- A diminuição da amplitude do sinal de controle, como proposto por, onde uma função de modulação é empregada para esse fim (UTKIN; LEE, 2006).

2.1.5 Controle por Modo Deslizante em Tempo Contínuo para um Sistema LTI

Considere um sistema Linear e Invariante no Tempo (LTI) descrito pelas equações que seguem a seguir:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (6)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (7)$$

onde $u(t)$ corresponde ao sinal de controle e as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{C} apresentam-se da seguinte forma:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (8)$$

Para um sistema escrito na forma apresentada em (6) e (7), pode-se propor a seguinte superfície de deslizamento (UTKIN; GULDNER; SHI, 1999):

$$\sigma(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i = \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_i + x_n \quad (9)$$

onde c_i é uma constante e $c_n = 1$, $x_i = x_i^{(n-1)}$.

Só haverá a existência do Modo Deslizante se o vetor de estados da planta, representado em (6), que inicialmente não está sobre a superfície, seja para ela atraído em tempo finito e nela permaneça. Assim, uma lei de controle pode ser definida como sendo a combinação de uma lei de controle nominal u_{nom} e uma lei de controle chaveante u_{sw} :

$$u = u_{nom} + u_{sw} \quad (10)$$

Para que a trajetória dos estados do sistema descrito em (6) seja direcionado para a superfície de deslizamento e que nela permaneça, pode-se usar um sinal de controle no qual $\dot{\sigma}(x) = 0$. Assim, se $\sigma(x) \rightarrow 0$, de modo a garantir que $x_i \rightarrow 0$, os parâmetros c_1, c_2, \dots, c_{n-1} do polinômio $s^{n-1} + c_{n-1}s^{n-2} + \dots + c_2s + c_1$ devem ser selecionados de modo que seja Hurwitz, onde s corresponde a frequência complexa de Laplace.

Com base na Equação (9), a superfície de deslizamento projetada será:

$$\sigma(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_{n-1} x_{n-1} + x_n \quad (11)$$

Para simplificar a notação, $\sigma(x)$ será chamado apenas de σ . Assim sendo, derivando

a Equação (11), tem-se:

$$\dot{\sigma} = c_1\dot{x}_1 + c_2\dot{x}_2 + \cdots + c_{n-1}\dot{x}_{n-1} + \dot{x}_n \quad (12)$$

Substituindo os termos apresentados em (8) na Equação (27):

$$\dot{\sigma} = -a_0x_1 + (c_1 - a_1)x_2 + (c_2 - a_2)x_3 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})x_n + b_0u \quad (13)$$

Definindo $\sigma := 0$, chamando $u = u_{nom}$ na Equação (13) e isolando este mesmo termo da referida Equação, chega-se a:

$$u_{nom} = -\frac{1}{b_0} [-a_0x_1 + (c_1 - a_1)x_2 + (c_2 - a_2)x_3 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})x_n] \quad (14)$$

A lei de controle chaveante, u_{sw} , é a mesma apresentada na Equação (5). Portanto, substituindo (14) e (5) em (10), obtém-se o seguinte sinal de controle:

$$u = -\frac{1}{b_0} [-a_0x_1 + (c_1 - a_1)x_2 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})x_n] - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (15)$$

2.1.5.1 Análise da Estabilidade

Para analisar a estabilidade com a lei de controle (10), considere primeiramente o lema a seguir.

Lema 2.1. *Seja $f, V : [0, +\infty) \in \mathbb{R}$, α uma constante finita, então $\dot{V} \leq -\alpha V + f$, $\forall t \geq t_0 \geq 0$ implica em (IOANNOU; SUN, 1996):*

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)}V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\xi)} f(\xi) d\xi. \quad (16)$$

Prova: Adotando que $\omega(t) \triangleq \dot{V} + \alpha V - f$, tem-se que $\omega(t) \leq 0$ e que $\dot{V} = -\alpha V + f + \omega$, conseqüentemente:

$$V(t) = e^{-\alpha(t-t_0)}V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\xi)} f(\xi) d\xi + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\xi)} \omega(\xi) d\xi \quad (17)$$

Uma vez que $\omega(t) < 0 \forall t \geq t_0 \geq 0$, tem-se:

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)}V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\xi)} f(\xi) d\xi \quad (18)$$

Assumindo que $f = 0$, então $\dot{V} \leq -\alpha V$ e isto implica em:

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)}V(t_0) \quad (19)$$

□

Se for escolhido um α de tal forma que o mesmo possua um valor constante positivo, $V(t) \rightarrow 0$ exponencialmente a uma taxa α .

Teorema 2.2. *A lei de controle apresentada em (15), ao ser aplicada no sistema descrito pelas equações (6) e (7) será exponencialmente convergente a uma taxa $\alpha = b_0\eta$ para $\eta > 0$ e $b_0 > 0$.*

Prova: Considere a seguinte função candidata de Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (20)$$

Derivando a Equação (20):

$$\dot{V}_1 = \sigma\dot{\sigma} \quad (21)$$

Substituindo (13) em (21):

$$\dot{V}_1 = \sigma \{-a_0x_1 + (c_1 - a_1)x_2 + \dots + (c_{n-1} - a_{n-1})x_n + b_0u\} \quad (22)$$

Incorporando em (22) os termos presentes na Equação (15), obtém-se:

$$\dot{V}_1 = \sigma \{-\eta b_0 \text{sgn}(\sigma)\} = -\eta b_0 \sigma |\sigma| = -\eta b_0 \sigma^2 = -2\eta b_0 V \leq 0 \quad (23)$$

□

Isto posto, pode-se concluir que $\sigma \rightarrow 0$ em tempo finito.

2.1.6 Exemplo Numérico

O exemplo a seguir, apresenta projeto de um controlador por modos deslizante para um sistema linear. Em seguida, será ilustrado o impacto dos atrasos estocásticos de comunicação para esse projeto em específico, primeiro, aplicando atrasos com valor máximo de 0,2 ms e por fim, com valor máximo de 1 ms, realizados a partir do bloco de geração de números aleatórios uniformemente distribuídos do *software* MATLAB[®] (em inglês, *uniformly distributed random numbers*).

Exemplo 2.1. Considere um sistema LTI descrito abaixo por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & 0,25 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t)\end{aligned}$$

Deseja-se, portanto, projetar uma lei de controle que seja capaz de estabilizar a planta e de trazer os estados para a origem.

Ao calcular os autovalores deste sistema, encontrou-se $\lambda_1 = 0,1250 + j2,4463 \text{ rad/s}$ e $\lambda_2 = 0,1250 - j2,4463 \text{ rad/s}$. Uma vez que possuem parte real positiva, a lei de controle a ser determinada deverá ser capaz de estabilizar a planta.

Conforme a Equação (11), uma possível superfície de deslizamento para este sistema é: $\sigma = c_1 x_1 + x_2$, onde, neste projeto em específico, o valor da constante $c_1 = 15$. Já para a lei de controle chaveante, tal como apresentada na Equação (5), o valor selecionado para $\eta = 1,5$. Portanto, a lei de controle para este exemplo é:

$$u = \frac{1}{15} [6x_1 - (15,25)x_2] - 1,5 \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (24)$$

Com o auxílio do software MATLAB® para executar as simulações cujos resultados seguem a seguir, e a fim de testar o comportamento da planta, foi aplicado como sinal de entrada o degrau unitário. Assim, na Figura 11 está a resposta do sistema em estudo. Nela, observa-se que, como desejável, a saída do sistema converge para um valor constante, sendo neste caso igual a 1.

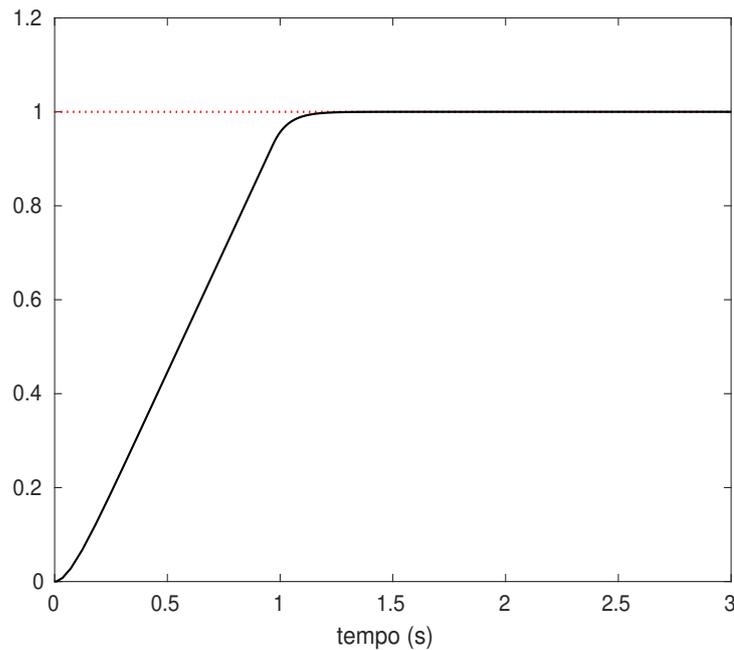


Figura 11 - Resposta ao degrau unitário.

A Figura 12 apresenta o sinal de controle aplicado ao sistema nesta simulação. Em conjunto com a Figura 13, onde está representado o plano de fase da trajetória no modo deslizante, pode-se observar que, uma vez que os estados da planta (curva em vermelho) chegam à superfície de deslizamento (reta na cor preta), é possível notar a ação da lei de controle chaveado.

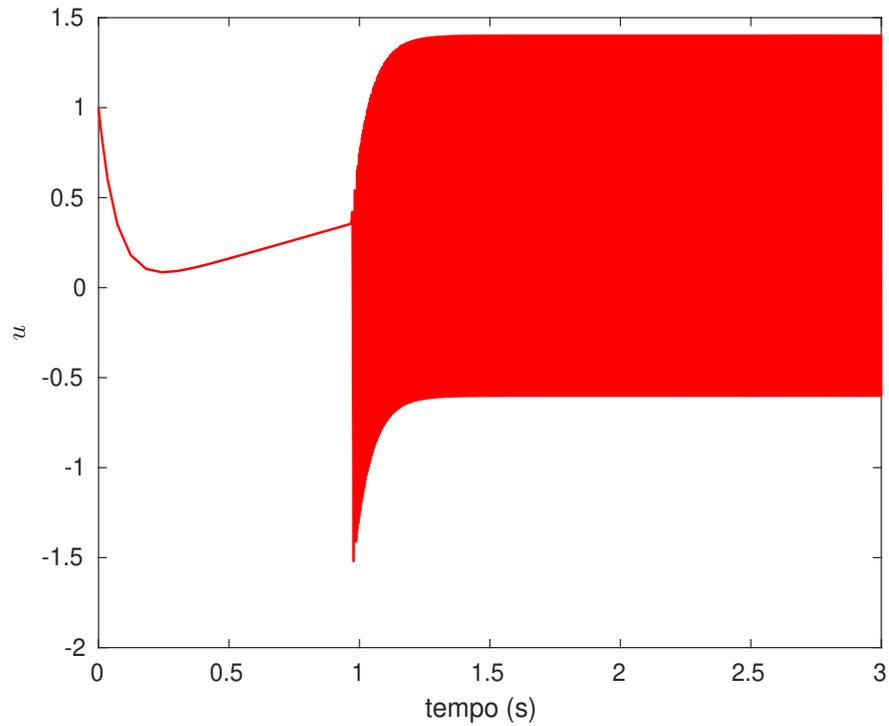


Figura 12 - Sinal de controle.

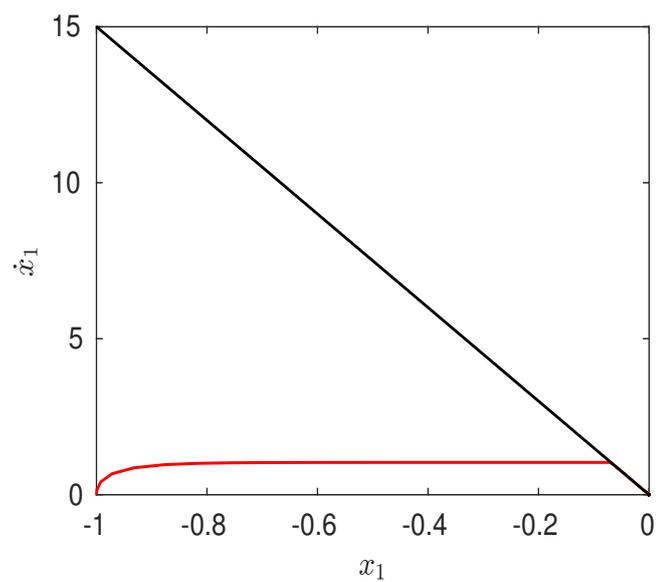


Figura 13 - Plano de fase da trajetória em modo deslizante.

Simulando agora o sistema com a presença de atrasos de comunicação no laço saída da planta e entrada do controlador, considerando atrasos com características estocásticas e valor máximo de 0,2 ms, observa-se na Figura 14, que os estados (curva em vermelho) até alcançam a superfície de deslizamento (reta na cor preta), mas dela escapam e retornam, de modo não periódico. Ainda, na Figura 15 pode-se notar que o sinal de controle passou a apresentar um comportamento bem diferente do observado na 12.

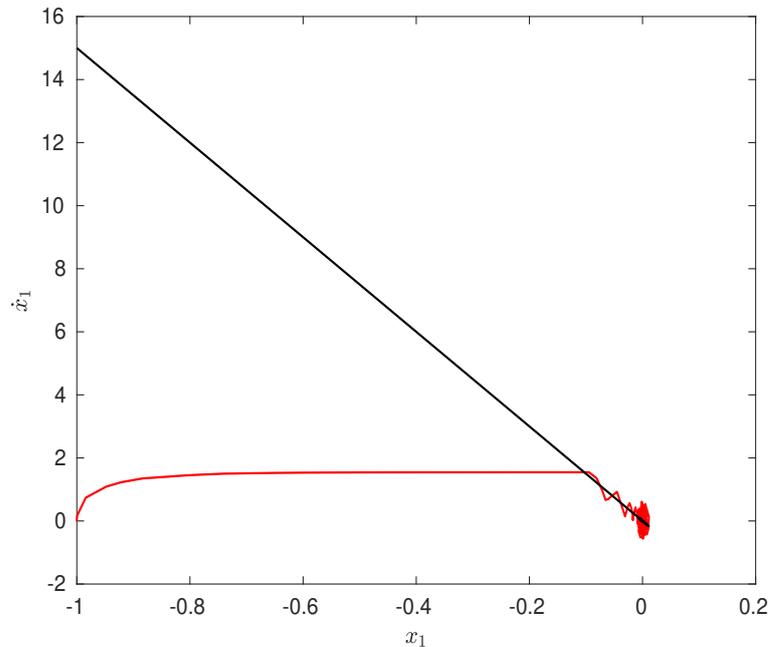


Figura 14 - Plano de fase da trajetória considerando atraso estocástico com valor máximo de 0,2 ms.

Na Figura 16, observa-se que até existe uma convergência para o valor unitário, mas o sinal de saída do sistema apresenta certas trepidações que, para determinadas aplicações, tem-se um comportamento não esperado.

Por fim, considerando o caso em que os atrasos variam estocasticamente e podem assumir valores máximos de até 1 ms, observa-se na Figura 17 que o sistema apresenta uma saída com grandes variações. Ainda, segundo a Figura 18, onde tem-se o plano de fase da trajetória, é possível constatar que a superfície de deslizamento é até atingida, mas nela não permanece, apenas a atravessa e continua a mover-se. Desse modo, em concordância com a Figura 19, onde tem-se o sinal de controle, observa-se que o sistema não entra no modo deslizante.

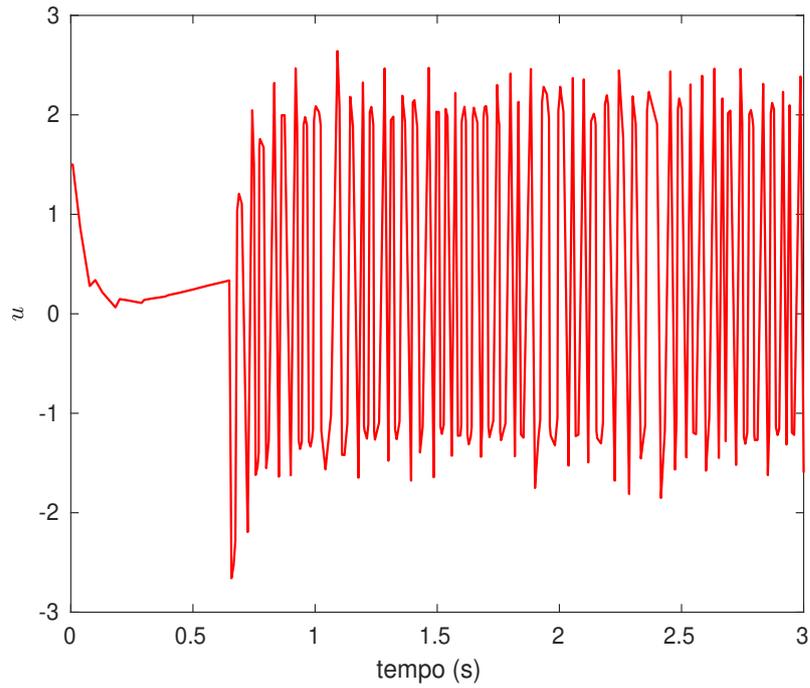


Figura 15 - Sinal de controle considerando atraso estocástico com valor máximo de 0,2 ms.

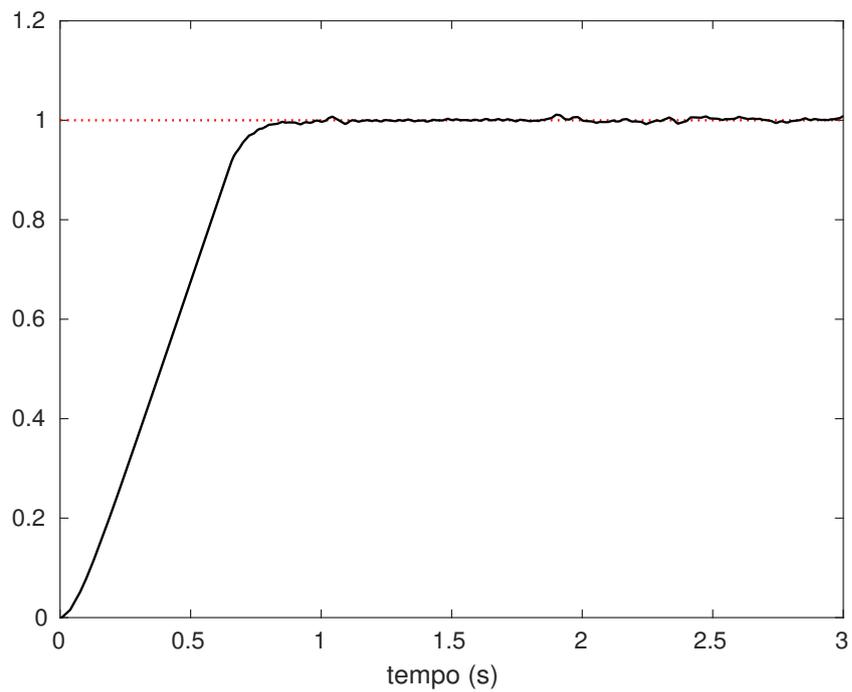


Figura 16 - Resposta ao degrau unitário do sistema considerando atraso estocástico com valor máximo de 0,2 ms.

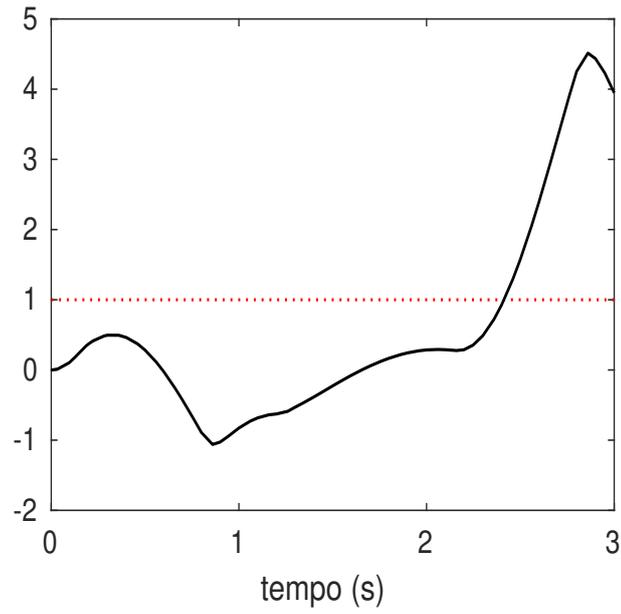


Figura 17 - Resposta ao degrau unitário do sistema considerando atraso estocástico com valor máximo de 1 ms.

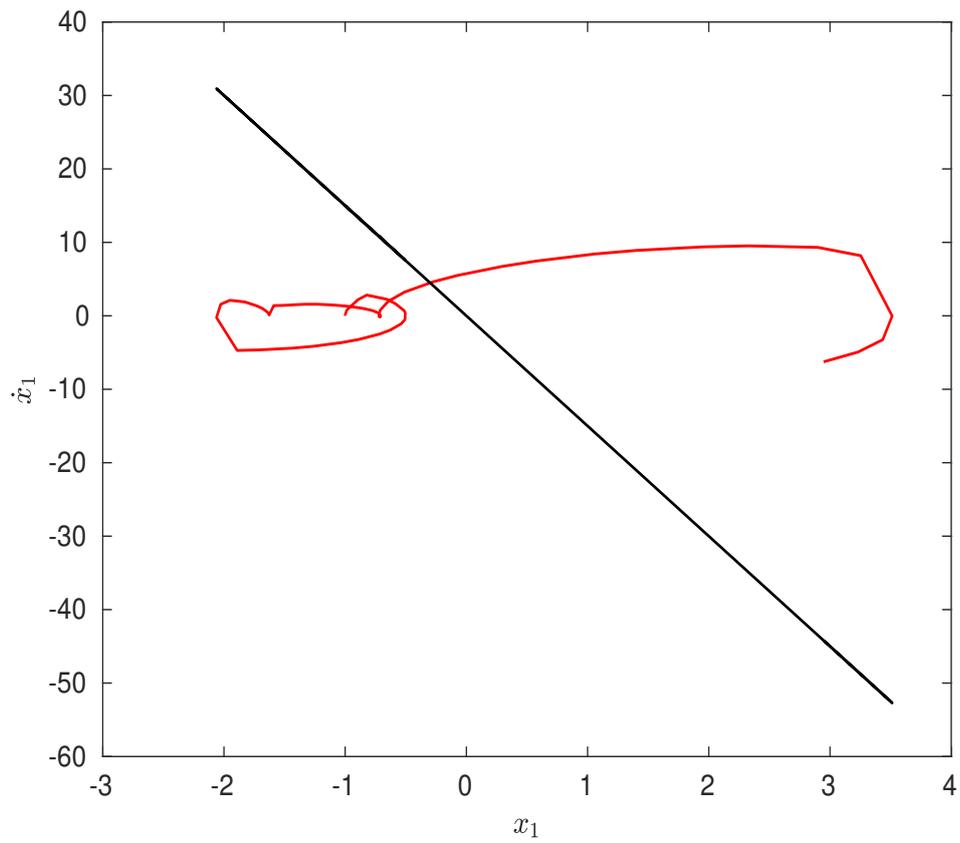


Figura 18 - Plano de fase da trajetória considerando atraso estocástico com valor máximo de 1 ms.

De modo análogo apresentado na seção anterior, os coeficientes c_1, c_2, \dots, c_{n-1} devem ser escolhidos de modo que o polinômio $s^{n-1} + c_{n-1}s^{n-2} + \dots + c_2s + c_1$ seja Hurwitz, onde s corresponde a frequência complexa de Laplace. Além disso, se a lei de controle for projetada de modo que $\sigma \rightarrow 0$, pode afirmar que $e^{(i)} \rightarrow 0$ assintoticamente, sendo $i = 0, 1, \dots, n - 1$. Assim sendo, a lei de controle nominal para este caso será:

$$u_{nom} = -\frac{1}{b_0} \left[-a_0x_1 + (c_1 - a_1)x_2 + \dots + (c_{n-1} - a_{n-1})x_n - \dot{y}_d - \dots - y_d^{(n)} \right] \quad (28)$$

A lei de controle a ser aplicada no sistema pode ser definida como sendo a combinação linear da lei apresentada em (28) e (5).

2.1.7 Exemplo Numérico

O exemplo a seguir apresenta projeto de um controlador por modos deslizante cujos principais objetivos são de estabilizar um dado sistema LTI e permitir que os estados sigam uma trajetória definida, $y_d = \text{sen}(t)$. De modo similar ao exemplo da seção 2.1.6, será ilustrado o impacto dos atrasos estocásticos de comunicação para esse projeto em específico. Neste caso, está-se considerando um atraso máximo de 0,2 ms, realizado a partir do bloco de geração de números aleatórios uniformemente distribuídos do *software* MATLAB® (em inglês, *uniformly distributed random numbers*). Além disso, o atraso de comunicação ocorre entre saída da planta e controlador. No laço entre controlador e planta não haverá a ocorrência de atraso.

Exemplo 2.2. *Considere um sistema LTI descrito abaixo por:*

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & 0,25 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 15 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \end{aligned}$$

Deseja-se projetar uma lei de controle que estabilize a planta e faça com que a saída $y(t)$ siga a mesma trajetória que $y_d(t)$.

De acordo a Equação (27), a superfície de deslizamento será: $\sigma = c_1e + \dot{e}$. Seleccionando os valores de $c_1 = 30$ e $\eta = 10$, a lei de controle que atende aos requisitos apontados neste exemplo é:

$$u = \frac{1}{15} [6x_1 - (30, 25)x_2 + \dot{y}_d + \ddot{y}_d] - 10 \text{sgn}(\sigma) \quad (29)$$

Na Figura 20 está representado o sinal de controle. Com ela, pode-se observar que a saída da planta converge para um determinado valor, visto que passado o período

em que os estados são trazidos a até a superfície de deslizamento, o sinal fica chaveando dentro de um valor limitado. Já a Figura 21 comprova que, tal como pretendido, a saída da planta $y(t)$, com a atuação do sinal de controle u , consegue seguir a trajetória desejada $y_d(t)$.

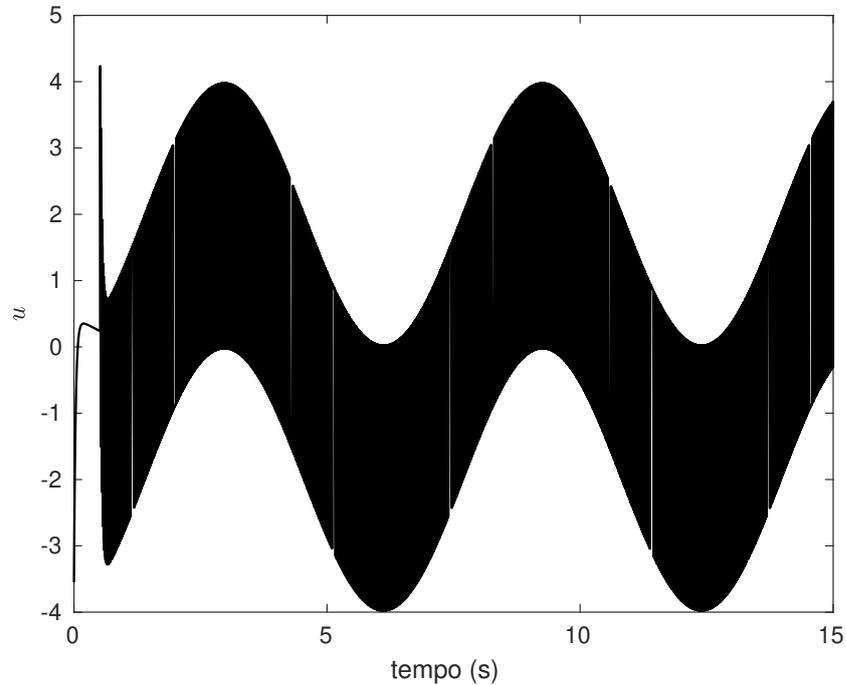


Figura 20 - Sinal de controle.

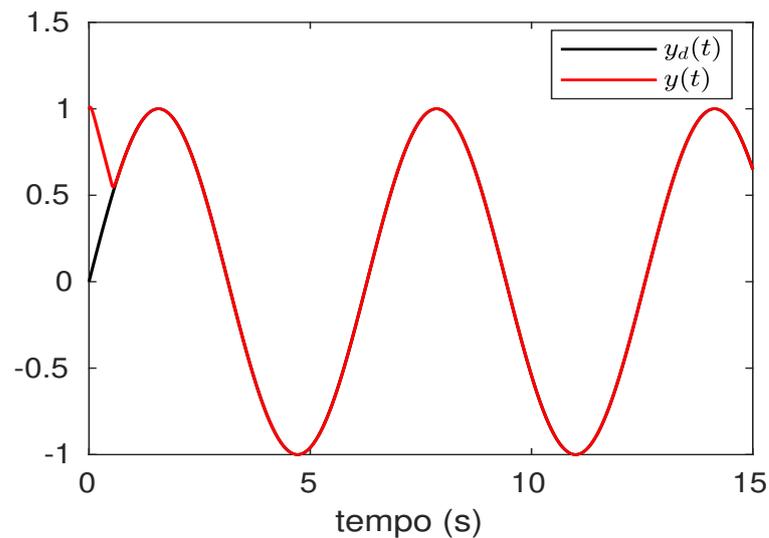


Figura 21 - Sinal de saída da planta em comparação com o sinal de saída desejado.

A Figura 22 apresenta a saída da planta $y(t)$ quando é imposta a condição de atrasos com características estocástica, assumindo que o valor máximo que pode ocorrer

é de 0,2 ms. Os atrasos foram aplicados entre o laço de saída da planta e a entrada do controlador. Observa-se que consegue-se rastrear a trajetória desejada, entretanto o sinal de saída possui um aspecto ruidoso, apresentando alguns saltos.

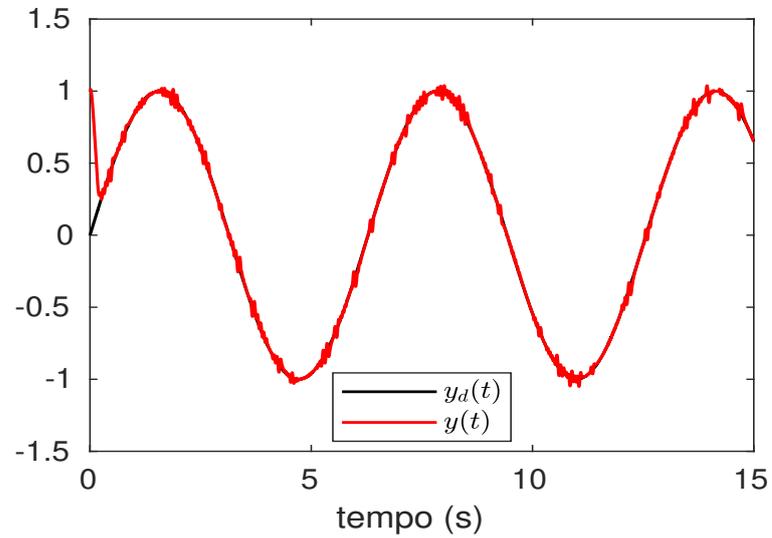


Figura 22 - Sinal de saída da planta em comparação com o sinal de saída desejado para o caso em há a presença de atrasos de comunicação estocásticos.

3 OBSERVADORES DE ESTADO PARA SISTEMAS COM ATRASOS ESTOCÁSTICOS

3.1 Observadores de Estado

Em muitas aplicações, dentre elas a de monitoramento e controle, por exemplo, nem todos os estados do sistema estão acessíveis (PILLONI et al., 2021). Nesses casos, utilizam-se os observadores de estado, que consistem em uma forma de estimar as variáveis de estado baseado nas medidas das variáveis de saída e das variáveis de controle. Para tanto, observadores de estado só podem ser projetados se, e somente se, as condições de observabilidade de um dado sistema forem satisfeita. Assim, pode-se afirmar que um observador é um subsistema reconstrutor do vetor de estados da planta. Além disso, seu modelo matemático é basicamente idêntico ao da planta, exceto por um termo que visa incorporar o erro de estimação (OGATA, 2011).

Quando é empregado um observador de estado e o mesmo tem a função de observar todas as variáveis de estado do sistema, independentemente de algumas dessas estarem disponíveis para medição direta, ele é denominado observador de estado de ordem completa. Em (PAN; CHAO, 2020), além de empregar SMC como solução para controle de turbinas eólicas *offshore*, os autores utilizam um observador para o torque aerodinâmico, com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema. Já em (BO et al., 2019), ao afirmar que a instalação de sensores de velocidades em motores de indução implicam em algumas dificuldades, tanto na instalação quanto no reparo, os autores propõem o uso de observadores de estado de ordem completa de modo a estimar a sua velocidade.

Por outro lado, um observador que estima menos que n variáveis de estado, onde n corresponde à dimensão do vetor de estado, é denominado de observador de estado de ordem reduzida. Se a ordem do observador de ordem reduzida for a menor possível, o observador será chamado de observador de estado de ordem mínima. Em (BHATTARAI et al., 2018), um observador de estado de ordem reduzida é proposto para um Gerador de Indução Duplamente Alimentado (*Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*). Assim, os estados são estimados usando apenas a tensão do estator e as medições de alimentação do gerador. Já no trabalho desenvolvido por (LU et al., 2018), um observador de ordem reduzida é proposto para um conversor Buck⁹, garantindo que o mesmo seja robusto à distúrbios externos e a variações internas de parâmetros.

⁹ O conversor Buck é um conversor CC/CC empregado quando se deseja reduzir a tensão de saída em relação a a tensão de entrada, sem que haja a alteração de polaridade (MELLO, 2011).

3.1.1 Projeto de Observadores de Estado

Conforme descrito por (LUENBERGER, 1964), o observador de estado completo para um sistema descrito por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\tag{30}$$

é dado por:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(y(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t))\tag{31}$$

onde $\hat{\mathbf{x}}$ corresponde à estimativa do estado \mathbf{x} e a matriz \mathbf{L} é a matriz de ganho do observador.

O modelo matemático do observador é praticamente idêntico ao da planta, com excessão de um termo adicional, que incorpora o erro de estimação para compensar as incertezas nas matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} e a ausência do erro inicial. O erro de estimação compreende na diferença entre a saída medida e a saída estimada, já o erro inicial, é a diferença entre o estado inicial e o estado inicial estimado.

Na Figura 23, está representado um observador de ordem similar ao que foi proposto por Luenberger (1964). Observe que as entradas do observador são a saída y e a entrada de controle u . O termo $\mathbf{L}(y(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}})$ da Equação (31) corresponde em um elemento que corrige continuamente a saída do modelo.

A equação do erro de observação pode ser obtida a partir da Equação (31):

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)\tag{32}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{B}u(t) - \mathbf{L}y(t) + \mathbf{L}\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)\tag{33}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}}(t)\tag{34}$$

Desse modo, pode-se garantir que $\tilde{\mathbf{x}}(t) \rightarrow 0$ à medida que $t \rightarrow +\infty$ para qualquer erro de estimação inicial $\tilde{\mathbf{x}}(t_0)$ se a equação característica presente em (35) tiver todas as suas raízes no semiplano lateral esquerdo. Tal fato só será possível se o sistema for completamente observável, ou seja, se a matriz de observabilidade \mathcal{O}_{ob} possuir posto completo. Por meio da equação a seguir determinam-se os valores da matriz de ganho \mathbf{L} :

$$\det(\lambda\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})) = 0\tag{35}$$

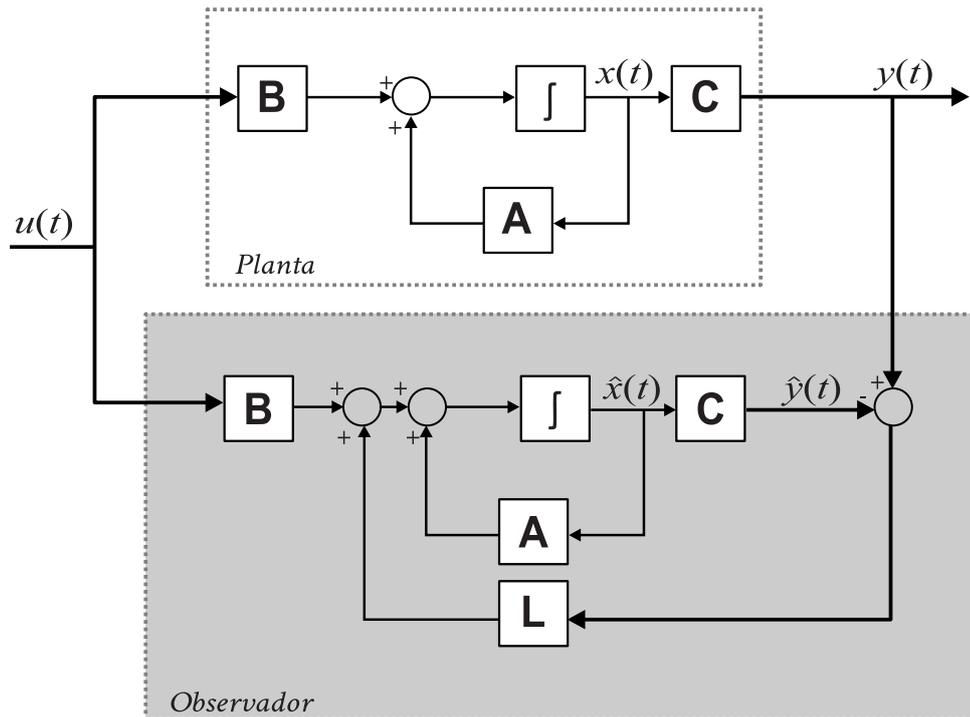


Figura 23 - Diagrama de blocos do observador de ordem plena, baseado em (HUSSEIN; SALIH; GHASM, 2017).

3.1.2 Exemplo Numérico

O exemplo a seguir, apresenta projeto do observador, conforme representado na Equação (31). Em seguida, será ilustrado o impacto dos atrasos de comunicação com características estocásticas para esse projeto em específico, assumindo que estes podem assumir um valor máximo de até 1 ms, realizado a partir do bloco de geração de números aleatórios uniformemente distribuídos do *software* MATLAB® (em inglês, *uniformly distributed random numbers*).

Exemplo 3.1. Considerando o sistema apresentado a seguir:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 6 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t)\end{aligned}$$

Dado que esse sistema é completamente observável, deseja-se projetar um observador cujos polos sejam $p_1 = -1$ rad/s e $p_2 = -2$ rad/s.

Ao calcular os valores do ganho do observador, encontram-se os seguintes valores: $\mathbf{L} = [3 \quad -6]^T$. Na Figura 24 pode-se observar que, após alguns instantes, o valor de saída do observador $\hat{y}(t)$ converge para o valor de saída da planta $y(t)$, ou seja, $\tilde{\mathbf{x}}(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow +\infty$.

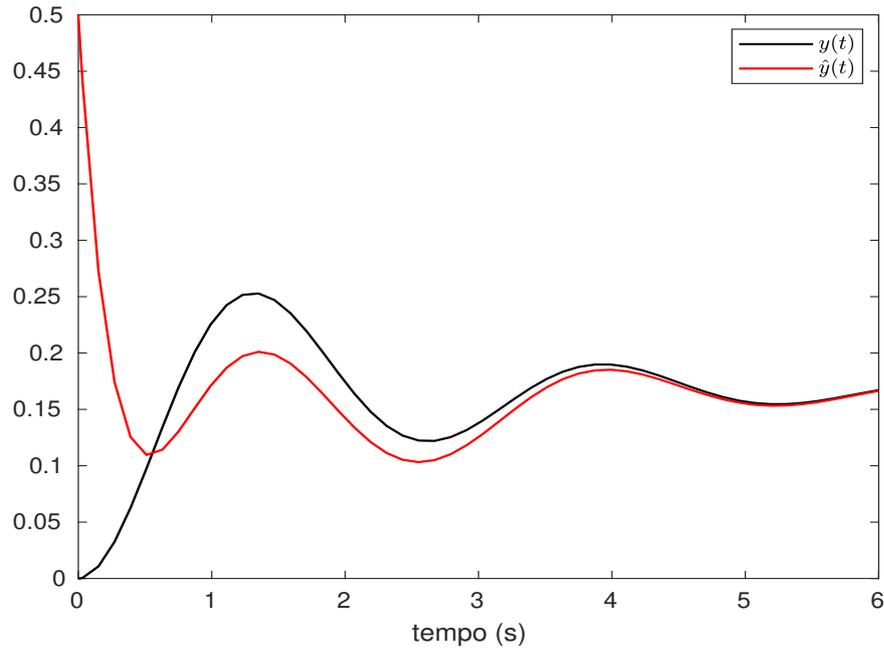


Figura 24 - Comparação entre a saída da planta $y(t)$ e a saída do observador $\hat{y}(t)$.

Já na Figura 25 tem-se a simulação para este mesmo projeto de observador, entretanto a saída da planta está sujeita a atrasos estocásticos de comunicação, podendo assumir um valor máximo de até 1 ms. Assim, observa-se que existe uma tentativa do observador em estimar os estados da planta, entretanto os efeitos dos atrasos não geram uma convergência satisfatória entre o valor de saída da planta $y(t)$ e o valor de saída estimado $\hat{y}(t)$.

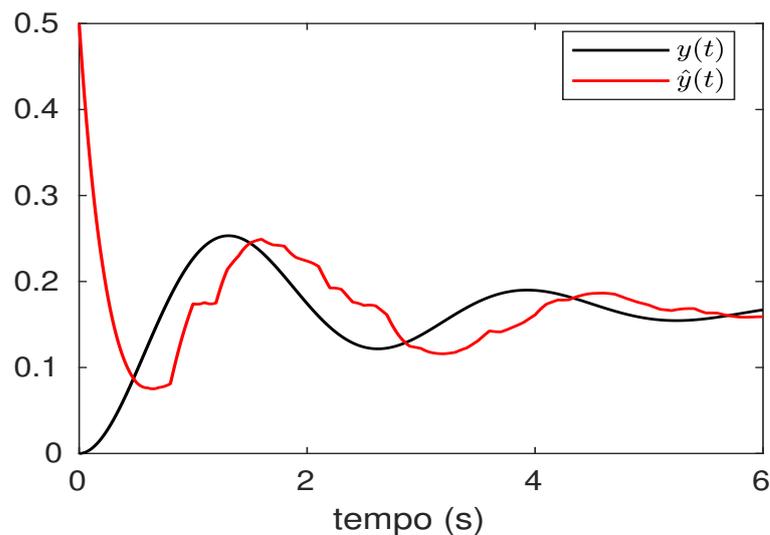


Figura 25 - Comparação entre a saída da planta $y(t)$ e a saída do observador $\hat{y}(t)$ na presença de atrasos estocásticos que podem assumir valor máximo de até 1 ms.

De fato, tal comportamento como apontado na Figura 25 era esperado e, a depender da magnitude do atraso, o observador pode sequer convergir para um valor finito. Assim, para casos envolvendo atrasos variáveis, (HE; LIU, 2014), por exemplo, propõe o projeto de um observador de estados onde existe a presença de atrasos no sinal de medição. Já para casos em que os atrasos são constantes, (KADER; ZHENG; BARBOT, 2017) propõem um observador de estados que permite a reconstrução dos estados em duas etapas.

3.2 Observadores de Estado para Sistemas com Atrasos de Características Estocásticas

Sistemas de controles com certos níveis de complexidade, como o de aeronaves e plantas industriais com elevado índice de automação de processos ou autônomas, por exemplo, requerem uma rede de comunicação que seja rápida e confiável, conectando os diversos sensores, atuadores e a planta. Nesta conexão, os atrasos de comunicação induzidos pela rede podem ter características variantes ou mesmo estocásticas.

Em uma descrição breve, os processos estocásticos podem ser definidos como processos onde o estado muda ao longo do tempo, sendo que essas mudanças não são totalmente previsíveis, mas estão associadas a distribuições de probabilidade (ALBUQUERQUE; FORTES; FINAMORE, 2008).

Uma variável estocástica é definida pelo conjunto de seus possíveis valores $\{\tau\}$ e, no caso contínuo, por uma função densidade de probabilidade $P(\tau)$, onde $P(\tau)d\tau$ resulta na probabilidade de que a variável tenha um valor entre τ e $\tau + d\tau$. Ainda, $P(\tau)$ satisfaz às condições de positividade e normalização, conforme Equações (36) e (37) (ALBUQUERQUE; FORTES; FINAMORE, 2008), (BASS, 2011) e (YATES; GOODMAN, 2017).

$$P(\tau) \geq 0 \tag{36}$$

$$\int_0^{+\infty} P(\tau)d\tau = 1 \tag{37}$$

No que diz respeito a sistemas de controle com atrasos, quer seja de comunicação ou nas variáveis de estados, o uso de observadores tem despertado a atenção de muitos pesquisadores, como em (PEARSON; FIAGBEDZI, 1987), onde propõem um observador para sistemas com atrasos nas variáveis de estado. Ainda, Ahmed-Ali et al. (2018), empregam um observador para sistemas não-lineares com grandes atrasos de comunicação. Por fim, em (PINTO; OLIVEIRA; HSU, 2019), um observador baseado em modo deslizando é apresentado para a reconstrução de sinais de saída da planta quando os mesmos são amostrados e estão sujeitos a longos atrasos.

Em sistemas que trabalham com dois domínios de tempo, ou seja, tempo contínuo e tempo discreto (sistemas híbridos), o trabalho desenvolvido por (TIAN et al., 2017), descreve um observador baseado em modo deslizante utilizado em uma planta em tempo contínuo cujos sinais provenientes dos sensores são discretizados e estão sujeitos a atrasos. De modo semelhante, Mohammed, Wang e Tian (2019) utilizam um observador para estimar em tempo contínuo as variáveis de estado de um sistema linear onde os sinais de medição são amostrados e sofrem atrasos de transmissão.

3.2.1 Projeto de Observadores de Estado

A Figura 26 representa o sistema que será objeto de estudo nesta seção. O sinal de saída da planta $y(t) \in \mathbb{R}^m$ é periodicamente amostrado por meio de um *zero-order hold* (ZOH), sendo este indicado por $\bar{y}(t)$ e sabendo que o mesmo está sujeito a atrasos de comunicação com características estocásticas τ_k . Um sinal $u(t) \in \mathbb{R}^r$ é aplicado na entrada da planta e do observador. O vetor contendo os estados estimados está indicado por $\hat{x}(t)$.

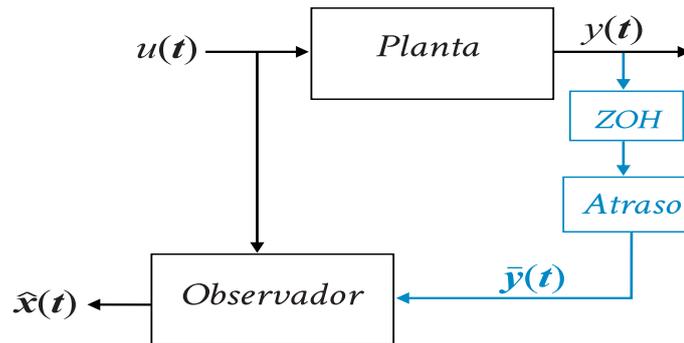


Figura 26 - Observador de estados para o caso em que o sinal de saída da planta é amostrado e atrasado.

As Equações a seguir descrevem a dinâmica da planta são:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\tag{38}$$

Na Figura 26 verifica-se que existem dois domínios de tempos distintos ocorrendo simultaneamente: o tempo discreto, visto o fato do sinal de saída da planta ser amostrado e discretizado; e o tempo contínuo, perfazendo os demais sinais nela indicados. O observador é capaz de receber sinais em tempo discreto e em tempo contínuo, gerando as estimativas dos estados em tempo contínuo. Assim, o domínio em tempo discreto é definido como $S = \{t_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ e o domínio em tempo contínuo é definido como $t \in \mathbb{R}^+$.

Dado que o atraso τ_k induzido pela rede apresenta variações com comportamento estocástico, na análise proposta neste trabalho, sua distribuição tem uma função de densidade de probabilidade conhecida ω_j com as seguintes propriedades (ANDRADE; CUNHA, 2018):

$$\omega_j \geq 0, \quad \forall \tau_k \in [0, h) \quad (39)$$

$$\omega_j = 0, \quad \forall \tau_k < 0 \quad (40)$$

$$\omega_j \leq 0, \quad \forall \tau_k \geq h \quad (41)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \omega_j d\tau_k(t) = \int_0^h \omega_j d\tau_k = 1 \quad (42)$$

Hipótese 3.1. *Os sensores empregados no sistema são considerados como sendo orientados no tempo (em inglês, time driven), ou seja, a saída $y(t)$ é amostrada nos instantes $t_k = kh$ periodicamente espaçados ($h > 0s$), onde h corresponde ao período de amostragem.*

Hipótese 3.2. *Os atrasos de comunicação $\tau_k \in [0, h)$ são conhecidos, mas possuidores características estocásticas.*

Hipótese 3.3. *O par de matrizes $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}\}$ é controlável e $\{\mathbf{C}, \mathbf{A}\}$ observável.*

Considerando que $\hat{\mathbf{x}}$ corresponde à estimativa dos estados \mathbf{x} e \mathbf{L} a matriz de ganho do observador, as Equações que descrevem o funcionamento do mesmo são:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(\bar{y}(t) - C\hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (43)$$

onde $\bar{y}(t)$ corresponde ao sinal de saída $y(t)$ após ser amostrado e sujeito aos atrasos estocásticos τ_k . Ainda, está-se considerando neste estudo que os instantes de amostragem do sinal de saída da planta $y(t)$ e do observador $\hat{y}(t)$ são sincronizados. Na literatura existem algumas técnicas para realizar este tipo de sincronismo, como em (SEURET et al., 2006), por exemplo, onde os autores propõem o uso de GPS.

Hipótese 3.4. *Assume-se que os atrasos de comunicação são conhecidos e que o sinal de saída da planta $y(t)$ e do observador $\hat{y}(t)$ são simultaneamente amostrados e mantidos constantes por meio do emprego de ZOH até que uma nova amostra do sinal de saída da planta esteja disponível.*

Assim sendo, o sinal $\bar{y}(t)$ é definido como sendo:

$$\bar{y}(t) = y[t_k] = \mathbf{C}\mathbf{x}[t_k], \quad t_k + \tau_k \leq t < t_{k+1} + \tau_{k+1} \quad (44)$$

Já a saída do observador (43) é definida como:

$$\hat{y}(t) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}[t_k], \quad t_k + \tau_k \leq t < t_{k+1} + \tau_{k+1} \quad (45)$$

O erro de estimação para o observador (43) pode ser definido como: $\tilde{\mathbf{x}} := \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$. Desse modo, subtraindo (38) e (43), tem-se:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{L}(\bar{y}(t) - \hat{y}(t)) \quad (46)$$

Por fim, definindo $\mathbf{x}_s[t_k] := \mathbf{x}[t_k] - \hat{\mathbf{x}}[t_k]$, a Equação (46) pode ser reescrita na forma:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{L}\mathbf{C}\mathbf{x}_s[t_k], \quad t_k + \tau_k \leq t < t_{k+1} + \tau_{k+1} \quad (47)$$

3.2.1.1 Determinação da Matriz de Ganho do Observador

Para determinar o ganho \mathbf{L} do observador proposto na Equação (43), as matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} são consideradas observáveis, de modo que, se não houvessem os atrasos de comunicação, a estimativa gerada pelo observador convergiria exponencialmente para o valor real dos estados. Por outro lado, uma vez que há a presença de atrasos, será apresentada uma forma de calcular \mathbf{L} proposta por (SILM et al., 2021), de modo que $\hat{\mathbf{x}}(t)$ convirja suficientemente rápido para o estado verdadeiro $\mathbf{x}(t)$ com uma taxa de decaimento exponencial α , considerando o máximo atraso de comunicação admissível $\bar{\tau}$.

Considerando a Equação (47) e aplicando a seguinte função de Lyapunov-Krasovskii para sistemas com atrasos variáveis de modo que haja convergência exponencial (FRIDMAN, 2014):

$$V(t, \tilde{\mathbf{x}}_t, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_t) = \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} + \int_{t-\bar{\tau}}^t e^{-2\alpha(t-s)} \tilde{\mathbf{x}}^T(s) \mathbf{S} \tilde{\mathbf{x}}(s) ds + \int_{t-\bar{\tau}}^t e^{-2\alpha(t-s)} (\bar{\tau} + s - t) \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(s) ds \quad (48)$$

em que $\mathbf{P} > 0$, $\mathbf{R} > 0$ e $\mathbf{S} > 0$. Assim, existe uma constante $\bar{k} > 0$ e $\underline{k} > 0$ de modo que $\underline{k} \|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|^2 \leq V(t, \tilde{\mathbf{x}}_t, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_t) \leq \bar{k} \|\tilde{\mathbf{x}}_t\|_W^2$ para $t \geq 0$ e $\tilde{\mathbf{x}}_t \in W_{[-\bar{\tau}, 0]}$.

Derivando e aplicando a regra de Leibniz para integrais, tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{V} + 2\alpha V &= 2\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{x}}^T(t) (2\alpha \mathbf{P} + \mathbf{S}) \tilde{\mathbf{x}}(t) - e^{-2\alpha\bar{\tau}} \tilde{\mathbf{x}}^T(t - \bar{\tau}) \mathbf{S} \tilde{\mathbf{x}}(t - \bar{\tau}) + \\ &\quad + \bar{\tau}^2 \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T(t) \mathbf{R} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) - \bar{\tau} \int_{t-\bar{\tau}}^t e^{-2\alpha(t-s)} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(s) ds \end{aligned} \quad (49)$$

Em seguida, considerando $e^{-2\alpha(t-s)} \geq e^{-2\alpha\bar{\tau}}$, para $s \in [t - \bar{\tau}, t]$, a hipótese 3.5 é

usada para tratar da integral remanescente na Equação (49):

Hipótese 3.5. *Assume-se que:*

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{S}_{12} \\ * & \mathbf{R} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (50)$$

para um \mathbf{S}_{12} que obedece à seguinte desigualdade:

$$-\bar{\tau} \int_{t-\bar{\tau}}^t \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(s) ds \leq \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}(t) \\ \tilde{\mathbf{x}}(t-\bar{\tau}) \\ \tilde{\mathbf{x}}(t-\tau_k(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\mathbf{R} & \mathbf{S}_{12} & \mathbf{R} - \mathbf{S}_{12} \\ * & -\mathbf{R} & \mathbf{R} - \mathbf{S}_{12} \\ * & * & -\mathbf{R} + \mathbf{S}_{12} + \mathbf{S}_{12}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}(t) \\ \tilde{\mathbf{x}}(t-\bar{\tau}) \\ \tilde{\mathbf{x}}(t-\tau_k(t)) \end{bmatrix} \quad (51)$$

□

Incorporando à dinâmica do sistema a ideia apresentada em (FRIDMAN, 2014), sendo que \mathbf{P}_2 e \mathbf{P}_3 são matrizes auxiliares, tem-se:

$$(\mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{P}_3 \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t))^T (\mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{L} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}(t - \tau_k(t)) - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t)) = 0 \quad (52)$$

Comparando com a hipótese 3.5 apresentado, chega-se a:

$$\dot{V} + 2\alpha V \leq \eta^T(t) \Psi \eta(t) \quad (53)$$

onde:

$$\eta(t) = \text{col}\{\tilde{\mathbf{x}}(t), \dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t), \tilde{\mathbf{x}}(t-\bar{\tau}), \tilde{\mathbf{x}}(t-\tau_k(t))\} \quad (54)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \mathbf{P} - \mathbf{P}_2^T + \mathbf{A}^T \mathbf{P}_3 & e^{2\alpha\bar{\tau}} \mathbf{S}_{12} & -\mathbf{P}_2 \mathbf{L} \mathbf{C} + e^{2\alpha\bar{\tau}} (\mathbf{R} - \mathbf{S}_{12}) \\ * & -\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_3^T + \bar{\tau}^2 \mathbf{R} & 0 & -\mathbf{P}_3^T \mathbf{L} \mathbf{C} \\ * & * & -e^{2\alpha\bar{\tau}} (\mathbf{S} - \mathbf{R}) & e^{2\alpha\bar{\tau}} (\mathbf{R} - \mathbf{S}_{12}) \\ * & * & * & e^{2\alpha\bar{\tau}} (-2\mathbf{R} + \mathbf{S}_{12} + \mathbf{S}_{12}^T) \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$\Psi_{11} = \mathbf{A}^T \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2^T \mathbf{A} + 2\alpha \mathbf{P} + \mathbf{S} - e^{2\alpha\bar{\tau}} \quad (56)$$

A existência da LMI $\Psi \leq 0$ implica na estabilidade exponencial, conquanto que:

$$\underline{k} |\tilde{\mathbf{x}}(t)|^2 \leq V(t, \tilde{\mathbf{x}}_t, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_t) \leq e^{2\alpha t} V(0, \tilde{\mathbf{x}}_0, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_0) \leq \bar{k} \|\tilde{\mathbf{x}}_0\|_W^2 \quad (57)$$

em que $\underline{k} |\tilde{\mathbf{x}}(t)|^2 = \lambda_{\min}(P)$ corresponde ao menor autovalor da matriz \mathbf{P} . Assim, para determinar o ganho \mathbf{L} , faz-se a seguinte substituição: $\mathbf{P}_3 = \epsilon \mathbf{P}_2$, para um $\epsilon > 0$, além de adotar $\mathbf{Y} = \mathbf{P}_2^T \mathbf{L}$ e a proposição que segue a seguir:

Lema 3.1. *Considerando $\bar{\tau} > 0$, $\alpha > 0$ e a variável ajustável $\epsilon > 0$. Considerando ainda as matrizes $\mathbf{P} > 0$, $\mathbf{S} > 0$, $\mathbf{R} > 0$, \mathbf{P}_2 , \mathbf{Y} e \mathbf{S}_{12} que satisfazem a condição apresentada em*

(50) e a LMI $\Psi \leq 0$, com:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \mathbf{P} - \mathbf{P}_2^T + \epsilon \mathbf{A}^T \mathbf{P}_2 & e^{2\alpha\bar{\tau}} \mathbf{S}_{12} & -\mathbf{Y}\mathbf{C} + e^{2\alpha\bar{\tau}}(\mathbf{R} - \mathbf{S}_{12}) \\ * & -\epsilon(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_2^T) + \bar{\tau}^2 \mathbf{R} & 0 & -\epsilon \mathbf{Y}\mathbf{C} \\ * & * & -e^{2\alpha\bar{\tau}}(\mathbf{S} - \mathbf{R}) & e^{2\alpha\bar{\tau}}(\mathbf{R} - \mathbf{S}_{12}) \\ * & * & * & e^{2\alpha\bar{\tau}}(-2\mathbf{R} + \mathbf{S}_{12} + \mathbf{S}_{12}^T) \end{bmatrix} \quad (58)$$

então o ganho \mathbf{L} para o observador pode ser calculado como sendo $\mathbf{L} = (\mathbf{P}_2^T)^{-1} \mathbf{Y}$, de modo que se garanta a convergência exponencial a uma taxa α para qualquer atraso que seja variante entre $0 < \tau_k(t) < \bar{\tau}$ (SILM et al., 2021).

3.2.1.2 Análise da Estabilidade

De acordo com (SILM et al., 2021), o sistema (47) é dito exponencialmente estável se existir uma constante escalar $\alpha > 0$ e $c \geq 1$ de modo que a para qualquer solução de $\tilde{\mathbf{x}}(t)$, a desigualdade a seguir é satisfeita para uma condição inicial arbitrária $\tilde{\mathbf{x}}_0 \in W_{[-\bar{\tau}, 0]}$:

$$\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\| \leq ce^{-\alpha t} \|\tilde{\mathbf{x}}_0\|_W, \quad \forall t \geq 0 \quad (59)$$

onde $\bar{\tau}$ corresponde ao máximo valor de atraso admissível.

Considerando que τ_k tem características estocásticas, a Equação (47) pode ser discretizada, conforme Åström e Wittenmark (2011, p. 38-39), na forma:

$$\tilde{\mathbf{x}}[k+1] = \Phi \tilde{\mathbf{x}}[k] + \Gamma_{0\tau_k} \tilde{\mathbf{x}}[k] + \Gamma_{1\tau_k} \tilde{\mathbf{x}}[k-1] \quad (60)$$

onde:

$$\Phi = e^{\mathbf{A}h} \quad (61)$$

$$\Gamma_{0\tau_k} = \left[\int_{\tau_k}^h e^{\mathbf{A}(h-t)} dt \right] \mathbf{L}\mathbf{C} \quad (62)$$

$$\Gamma_{1\tau_k} = \left[\int_0^{\tau_k} e^{\mathbf{A}(h-t)} dt \right] \mathbf{L}\mathbf{C} \quad (63)$$

Definindo o vetor de estados aumentados como sendo:

$$\mathbf{X}[k] := \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}[k] \\ \tilde{\mathbf{x}}[k-1] \end{bmatrix} \quad (64)$$

a Equação (60) pode ser reescrita como:

$$\mathbf{X}[k + 1] = \mathbf{\Phi}_{\tau_k} \mathbf{X}[k] \quad (65)$$

em que a matriz de transição de estados variante no tempo por conta dos atrasos estocásticos é:

$$\mathbf{\Phi}_{\tau_k} = \begin{bmatrix} (\mathbf{\Phi} + \mathbf{\Gamma}_{0_{\tau_k}}) & \mathbf{\Gamma}_{1_{\tau_k}} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Em (SADEGHPOUR; OROSZ, 2016), é apresentado um método para análise de estabilidade do sistema (65) que, segundo os autores, apresenta-se como sendo menos conservativo. Assim, considerando que $\mathbf{\Phi}_{\tau_k}$ é independente e identicamente distribuída (i.i.d.), a média do sistema (65) pode ser calculada como sendo:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k + 1]\} &= \mathbb{E}\{\mathbf{\Phi}_{\tau_k} \mathbf{X}[k]\} = \mathbb{E}\{\mathbf{\Phi}_{\tau_k}\} \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\} \\ &= \left(\sum_{j=1}^J \mathbb{P}\{\mathbf{\Phi}_{\tau_k}[k] = [\mathbf{\Phi}_{\tau_k}]_j\} [\mathbf{\Phi}_{\tau_k}]_j \right) \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\} \\ &= \left(\sum_{j=1}^J \omega_j [\mathbf{\Phi}_{\tau_k}]_j \right) \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\} \end{aligned} \quad (67)$$

onde ω_j corresponde a função densidade de probabilidade do atraso estocástico τ_j , J é o número total de atrasos sendo considerado na análise.

Definindo a matriz de transição da média como sendo:

$$\bar{\mathbf{\Phi}} = \left(\sum_{j=1}^J \omega_j [\mathbf{\Phi}_{\tau_k}]_j \right) \quad (68)$$

A dinâmica da média do sistema (65) pode ser reescrita como sendo:

$$\mathbb{E}\{\mathbf{X}[k + 1]\} = \bar{\mathbf{\Phi}} \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\} \quad (69)$$

De acordo com (SADEGHPOUR; OROSZ, 2016), a estabilidade para a média do sistema (65) pode ser determinada usando a definição apresentada a seguir:

Definição 3.1. Considere a média da dinâmica de um sistema representada pela Equação (69). Se o raio espectral da matriz da Equação (68) for menor que 1, ou seja, $\rho(\bar{\mathbf{\Phi}}) < 1$, $\mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\} \rightarrow 0$ quando $k \rightarrow +\infty$.

Uma segunda análise proposta por (SADEGHPOUR; OROSZ, 2016), consiste em avaliar a estabilidade do segundo momento da Equação (65) e a partir disso avaliar a

estabilidade do referido sistema dinâmico. Assim:

$$\begin{aligned}
\mathbb{E}\{\mathbf{X}[k+1]\mathbf{X}^T[k+1]\} &= \mathbb{E}\{\Phi_{\tau_k}\mathbf{X}[k]\mathbf{X}^T[k]\Phi_{\tau_k}^T\} \\
&= \sum_{j=1}^J \mathbb{P}\{\Phi_{\tau_k}[k] = [\Phi_{\tau_k}]_j\} \mathbb{E}\{\Phi_{\tau_k}\mathbf{X}[k]\mathbf{X}^T[k]\Phi_{\tau_k}^T | \Phi_{\tau_k} = [\Phi_{\tau_k}]_j\} \\
&= \sum_{j=1}^J \omega_j \Phi_{\tau_k} \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\mathbf{X}^T[k] | \Phi_{\tau_k} = [\Phi_{\tau_k}]_j\} [\Phi_{\tau_k}]_j^T \\
&= \sum_{j=1}^J \omega_j [\Phi_{\tau_k}]_j \mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\mathbf{X}^T[k]\} [\Phi_{\tau_k}]_j^T
\end{aligned} \tag{70}$$

Com o objetivo de vetorizar a Equação (70), emprega-se o operador vec na Equação (70). Desse modo:

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}}[k] := \text{vec}\left(\mathbb{E}\{\mathbf{X}[k]\mathbf{X}^T[k]\}\right) \in \Re^{m^2(n_j+1)^2} \tag{71}$$

Portanto, (70) pode ser reescrita como:

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}}[k+1] = \overline{\overline{\Phi}} \overline{\overline{\mathbf{X}}}[k] \tag{72}$$

onde:

$$\overline{\overline{\Phi}} = \sum_{j=1}^J (\omega_j [\Phi_{\tau_k}]_j \otimes [\Phi_{\tau_k}]_j) \tag{73}$$

Lema 3.2. *Considere a Equação (72). Se o raio espectral de (73) for menor que 1, ou seja, $\rho(\overline{\overline{\Phi}}) < 1$, então $\overline{\overline{\mathbf{X}}}[k]$ converge exponencialmente para a origem quando $k \rightarrow +\infty$.*

Isto posto, a partir do lema 3.2, tem-se a condição suficiente e necessária para a estabilidade da dinâmica descrita em (72), o que, segundo (SADEGHPOUR; OROSZ, 2016), implica em uma estabilidade quase certa do sistema (65). Uma vez que a estimação dos estados em tempo contínuo, segundo a Equação (46), pode crescer no máximo exponencialmente entre duas amostras consecutivas, pode-se afirmar que a convergência de $\tilde{\mathbf{x}}[k]$ para a origem também implica na convergência de $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ para a origem.

3.2.1.3 Estabilidade do Sistema em Malha Fechada

Para a estabilidade do sistema em malha fechada, considerando agora a composição planta, observador e controlador por Modo Deslizante, considere o teorema que segue a seguir:

Teorema 3.2. *Considere um sistema representado pela Equação (38), tendo seu sinal de saída amostrado e sujeito a atrasos estocásticos. Utiliza-se também a lei de controle (10), que combina o controle nominal (28) com o controle chaveado (5), no qual σ está indicado na Equação (27). Além disso, considere o vetor de erro de rastreamento apresentado em (26). Se as proposições 3.1–3.3 são válidas e o raio espectral da matriz (73) atende à desigualdade $\rho(\overline{\Phi}) < 1$, então haverá a estabilidade quase certa do erro de estimação $\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\| \rightarrow 0$ e os erros de rastreamento $\|\mathbf{e}(t)\| \rightarrow 0$ e $e_o(t) := y(t) - y_d(t) \rightarrow 0$ exponencialmente quando $t \rightarrow +\infty$.*

Prova: A estabilidade quase certa do erro de estimação decorre do lema 3.2.

Para mostrar a convergência do sinal σ , considere a seguinte função candidata de Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (74)$$

Derivando (74), tem-se:

$$\dot{V}_1 = \sigma\dot{\sigma} \quad (75)$$

Com base em (11) e considerando, entretanto que no controlador são empregados os estados amostrados, e não os estados verdadeiros, tem-se:

$$\sigma = c_1\hat{x}_1 + c_2\hat{x}_2 + \cdots + c_{n-1}\hat{x}_{n-1} + \hat{x}_n \quad (76)$$

Derivando a Equação (76), tem-se:

$$\dot{\sigma} = c_1\dot{\hat{x}}_1 + c_2\dot{\hat{x}}_2 + \cdots + c_{n-1}\dot{\hat{x}}_{n-1} + \dot{\hat{x}}_n \quad (77)$$

Substituindo os termos da Equação (43) em (77):

$$\dot{\sigma} = -a_0\hat{x}_1 + (c_1 - a_1)\hat{x}_2 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})\hat{x}_n + b_0u + \mathbf{L}(\bar{y}(t) - C\hat{y}(t)) \quad (78)$$

Como $\mathbf{L}(\bar{y}(t) - C\hat{y}(t)) \rightarrow 0$ à medida que $t \rightarrow +\infty$, a Equação (78) pode ser reescrita como:

$$\dot{\sigma} = -a_0\hat{x}_1 + (c_1 - a_1)\hat{x}_2 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})\hat{x}_n + b_0u \quad (79)$$

Substituindo (78) em (75):

$$\dot{V}_1 = \sigma\{-a_0\hat{x}_1 + (c_1 - a_1)\hat{x}_2 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})\hat{x}_n + b_0u\} \quad (80)$$

De modo semelhante a (15), tem-se o sinal de controle u . Todavia, como o controlador

utiliza os estados amostrados, tem-se:

$$u = -\frac{1}{b_0} [-a_0\hat{x}_1 + (c_1 - a_1)\hat{x}_2 + \cdots + (c_{n-1} - a_{n-1})\hat{x}_n] - \eta \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (81)$$

Substituindo (81) em (80), obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -\eta b_0 \operatorname{sgn}(\sigma) \\ &= -\eta b_0 \sigma |\sigma| = -\eta b_0 \sigma^2 = -2\eta b_0 V \leq 0, \end{aligned} \quad (82)$$

o que permite concluir que $\sigma \rightarrow 0$ em tempo finito. Por fim, uma vez que $\sigma \rightarrow 0$ em tempo finito, então o erro de rastreamento converge para zero, pois a Equação diferencial (27) com $\sigma = 0$ é exponencialmente estável. \square

3.2.2 Exemplo Numérico

O exemplo a seguir, consiste em um reprojeto do observador do sistema apresentado no Exemplo 3.2. Para tanto, serão empregados os conceitos apresentados ao longo da seção 3.2. Para a simulação será considerado um período de amostragem igual a 0,1 s e um atraso com característica estocástica, podendo assumir um valor máximo de 0,20 ms, realizado a partir do bloco de geração de números aleatórios uniformemente distribuídos do *software* MATLAB[®] (em inglês, *uniformly distributed random numbers*).

Exemplo 3.2. *Considerando o sistema apresentado a seguir:*

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \end{aligned}$$

Dado que esse sistema é completamente observável, deseja-se projetar um observador de estados de modo que, mesmo sujeito a atrasos estocásticos de comunicação do sinal de saída da planta $y(t)$, haja convergência entre a saída amostrada e atrasada do observador e a saída amostrada e atrasada da planta.

Para o cálculo da matriz de ganho \mathbf{L} foi empregado o método apresentado na seção 3.2.1.1. Dessa forma, os valores computados foram $\mathbf{L} = [2, 175 \ 1, 378]^T$.

A Figura 27 mostra o sinal de saída da planta amostrado e atrasado e o sinal de saída do observador igualmente amostrado e atrasado. Com este gráfico, pode-se constatar que, mesmo sob a incidência de atrasos com características estocásticas, há convergência entre o valor de saída do observador e da planta.

Aplicando o lema 3.2 para testar a estabilidade do sistema em questão, constatou-

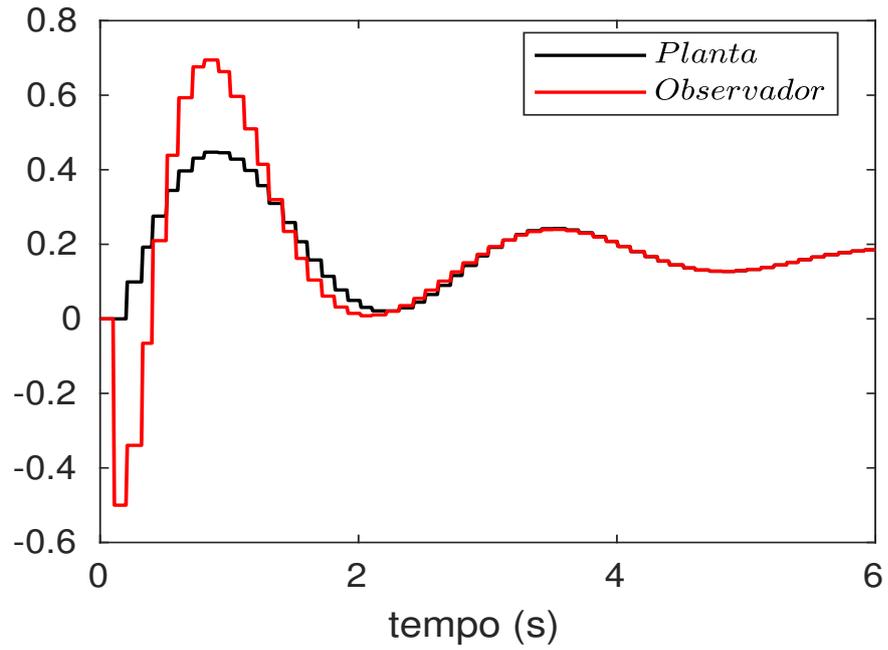


Figura 27 - Gráfico dos sinais amostrados e atrasados da saída da planta e do observador.

se que a condição de raio espectral menor que 1 é atendida. Neste caso, obteve-se um valor igual a 0,0630, satisfazendo assim o critério de estabilidade quase certa.

4 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

No Capítulo 1 discutiu-se brevemente sobre as redes de automação industrial, sobretudo as redes sem fio. Ainda, houve a apresentação de alguns fatores que levam a ocorrência de atrasos de comunicação. Já o Capítulo 2, fez uma breve apresentação teórica da técnica de controle por modo deslizante, bem como projetá-lo. Por fim, o Capítulo 3 dissertou sobre os observadores de estados, como projetá-los e ainda efetuou a proposição do seu uso sistemas sujeitos a atrasos estocásticos de comunicação.

Neste Capítulo, será formalizada a combinação do uso do observador de estados com o controle por modo deslizante para tratar do atraso estocástico de comunicação de um sistema de controle que possui um laço de comunicação sem fio, neste caso o ZigBee. Para tanto, dados obtidos experimentalmente por (ANDRADE; CUNHA, 2018) serão usados, enriquecendo as simulações que serão apresentadas neste trabalho. Além disso, para melhor ilustrar as diferenças que cada protocolo de comunicação possui e melhor ilustrar a estratégia de compensação proposta nesta Dissertação, serão efetuadas simulações com o protocolo Wi-Fi no modo TCP.

4.1 Apresentação do Sistema em Estudo

Na Figura (28), tem-se a representação típica do sistema que será objeto de estudos e análises neste Capítulo. No laço de comunicação via rede (destacado pela cor em azul), existe a ocorrência de atraso de comunicação com característica estocástica. O sinal $u(t) \in \mathbb{R}^r$ corresponde ao sinal de controle, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ é o sinal de saída, $\bar{y}(t)$ é o sinal amostrado e sujeito a atrasos estocásticos, $\hat{\mathbf{x}}(t)$ são os estados estimados, \mathbf{x}_d é um sinal de referência que contém as trajetórias desejadas. Por fim, *ISL* (do inglês, *Ideal Sliding Loop*) indica o laço onde ocorre o modo deslizante ideal (UTKIN, 1992).

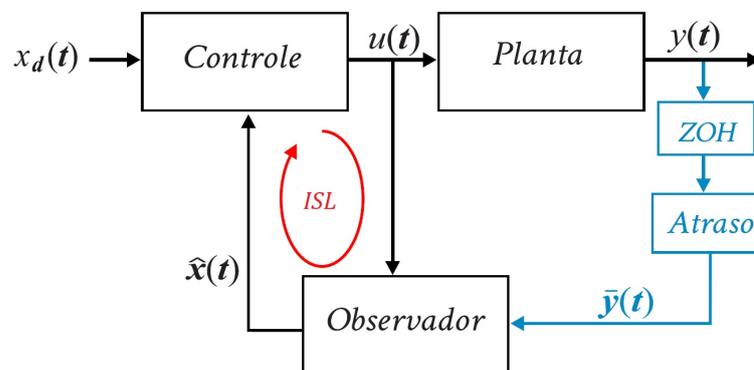


Figura 28 - Sistema de controle em estudos sujeito a atrasos estocásticos de comunicação.

Para o sistema representado na Figura (28), valem as hipóteses 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, bem como as Equações (43) para o observador e a combinação linear de (28) e (5) para o controle. Considere ainda as seguintes equações dinâmicas para a planta:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (83)$$

onde o sinal de saída $y(t)$ é amostrado por meio de um ZOH com período de amostragem $h = 0,1$ s. Os atrasos induzidos pela rede com características estocásticas são conhecidos e o máximo valor que podem assumir é menor que h . Ainda, para os casos que seguem a seguir, foram usadas as seguintes condições iniciais: para a planta $\mathbf{x}_0 = [1 \quad -1]^T$, e para o observador $\hat{\mathbf{x}}_0 = [-1 \quad 1]^T$.

4.1.0.1 Resultados e Simulações Empregando o Protocolo ZigBee

Segundo (ANDRADE; CUNHA, 2018), os testes executados com a finalidade de mensurar os atrasos de comunicação consistiram no envio de pacote de dados entre um módulo transmissor e um módulo receptor, ambos acoplados a um microcontrolador Arduino UNO. Além disso, uma redundância cabeada foi utilizada de modo a permitir validar informações como perda de pacotes e o valor do tempo de atraso de comunicação. A Tabela 2 resume os dados coletados neste experimento para um total de 11306 pacotes enviados.

Tabela 2 - Dados coletados e estatísticos para o experimento com o protocolo ZigBee. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.

Parâmetro	Módulo ZigBee Series 2
Atraso mínimo (em ms)	7,944
Atraso máximo (em ms)	74,212
Atraso médio (em ms)	10,666
Desvio Padrão (em ms)	2,814
Perda de Pacotes	0 %

Como esperado, devido as características deste tipo de protocolo, não houve perdas de pacotes durante o experimento, reforçando a robustez deste protocolo.

Em seguida, na Figura 29 segue histograma onde pode-se observar a distribuição da frequência dos atrasos de comunicação. Em consonância com a Tabela 2, existe uma concentração dos atrasos em torno do valor de 10 ms. Tal fato foi um dos fatores em selecionar este valor para cálculo do ganho do observador. Além disso, comparativamente observa-se pouca frequência de ocorrência dos atrasos sobretudo um pouco depois de

15 ms. Por conta deste fato, inclusive, o gráfico teve o eixo com valores dos atrasos limitados a até 25 ms, visto que, além deste valor, visualmente não era possível perceber a quantidade de pacotes sujeito a atrasos. Entretanto, ressalta-se que os atrasos estão distribuídos entre os valores mínimo e máximo registrados na Tabela 2. Já na Figura 30 tem-se a indicação dos atrasos τ_k percebidos durante todo o intervalo de execução da simulação, neste caso 10 ms.

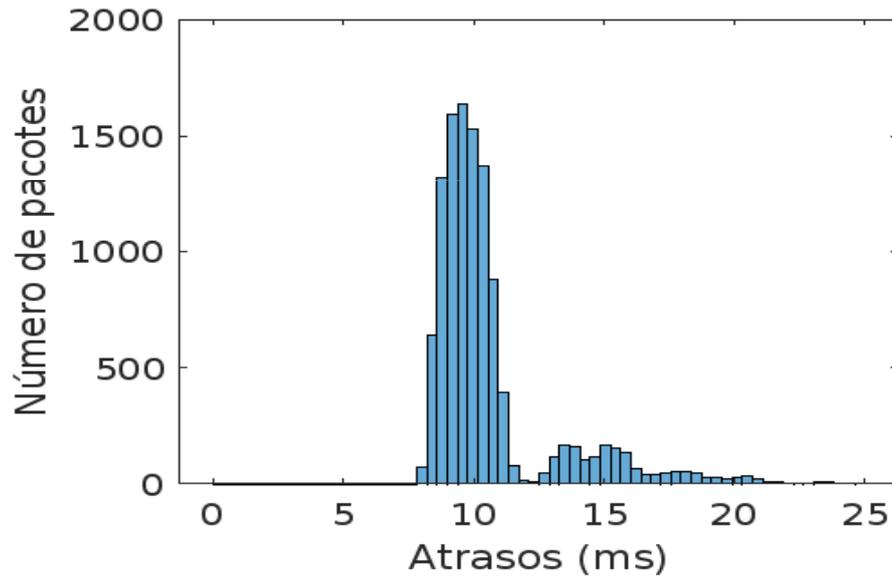


Figura 29 - Histograma dos atrasos medidos para o protocolo ZigBee. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.

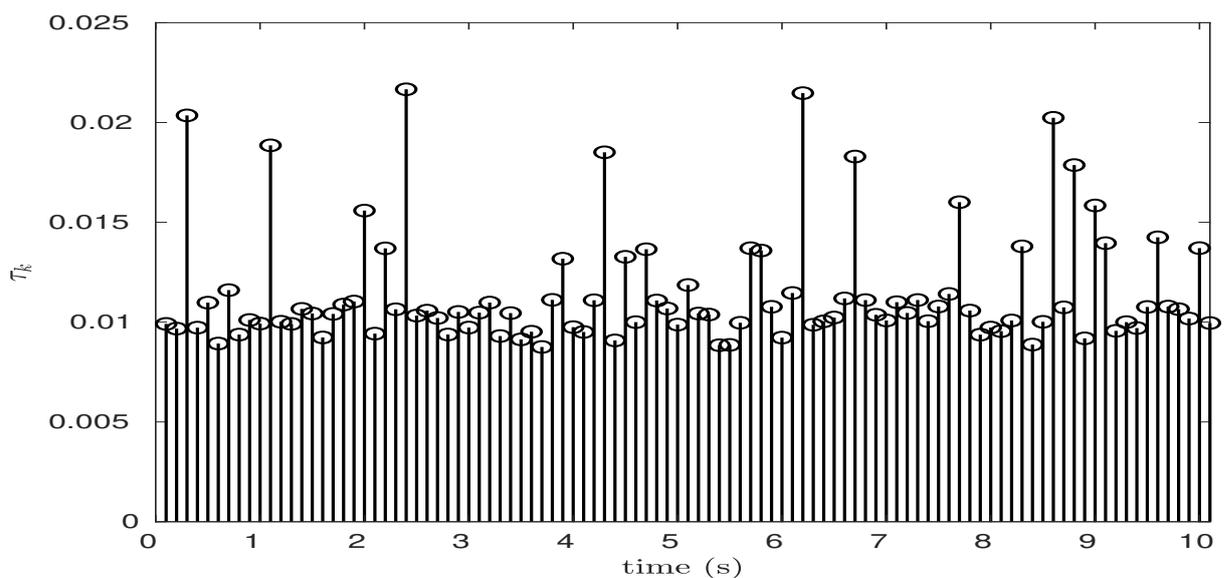


Figura 30 - Atrasos medidos durante a simulação.

Analisando apenas a planta, identifica-se que ela é instável, pois possui um autovalor com parte real positiva, $\lambda_1 = 0,6180$ rad/s. Já seu segundo autovalor possui parte real negativa, $\lambda_2 = -1,618$ rad/s. Em seguida, constata-se que a planta é observável (CHEN, 1999, p.153-158) e controlável (CHEN, 1999, p.144-150), pois ambas as matrizes de observabilidade e controlabilidade possuem posto completo. Assim, o sinal de controle projetado deve ser capaz de estabilizar a planta, além de permitir que a saída rastreie uma trajetória desejada, neste caso $y_d = \text{sen}(t)$.

Com base nas informações da Tabela 2 foram calculados, segundo método apresentado na seção 3.2.1.1 os seguintes valores de ganho para o observador: $\mathbf{L} = [2,031 \ 1,026]^T$. Já para o projeto do controlador, os parâmetros são: $\eta = 55$ e $c_1 = 1.1$. Portanto, a lei de controle projetada é:

$$u = [-\hat{x}_1 - 0,1\hat{x}_2 + \dot{y}_d + \ddot{y}_d] - 55 \text{sgn}(\sigma) \quad (84)$$

A Figura 31 apresenta os erros de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 . Nela, pode-se observar que existe uma convergência entre a saída do observador e a saída da planta. Portanto, passado alguns instantes de tempo, o erro de estimação para as duas variáveis vão para zero.

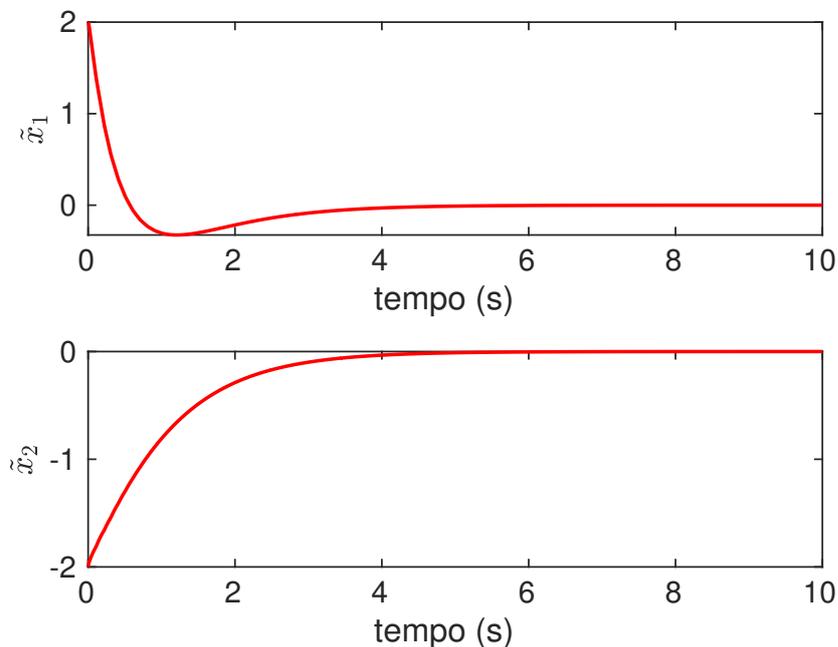


Figura 31 - Erros de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 .

A Figura 32 complementa e ratifica as conclusões obtidas a partir da Figura 31, uma vez que pode-se verificar o comportamento das de cada uma das variáveis de estado ao longo do tempo, bem como de suas estimativas. Dessa forma, constata-se a presença da convergência entre o valor estimado e o valor real. Além disso, é possível perceber que,

conforme requerido, os estados (e suas estimativas) perseguem, passado alguns instantes, a trajetória desejada.

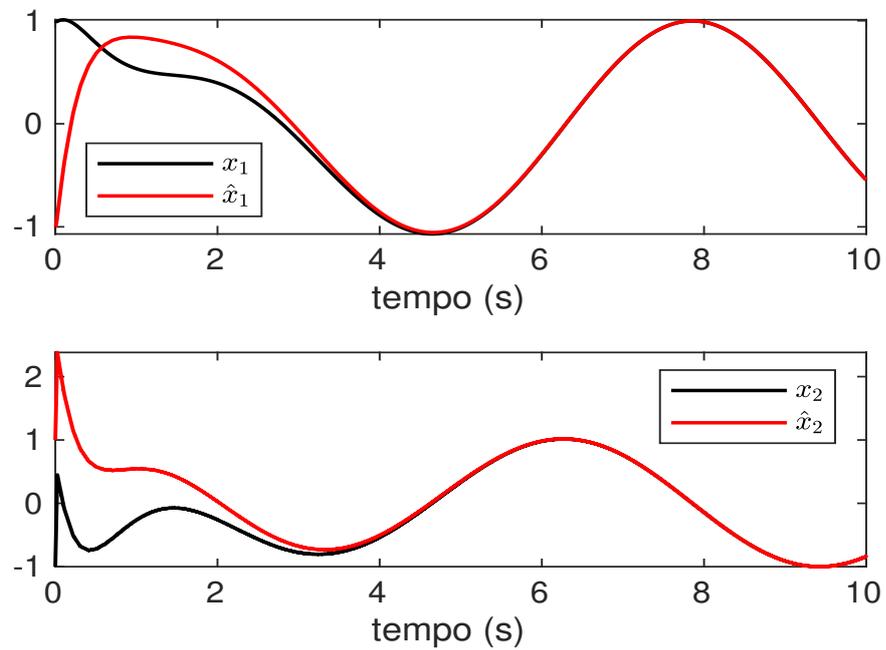


Figura 32 - Comparação entre as variáveis de estado x_1 e x_2 e suas estimativas.

Na Figura 33 tem-se o sinal de controle $u(t)$ aplicado na entrada da planta e do observador de estados, gerado a partir da Equação (84).

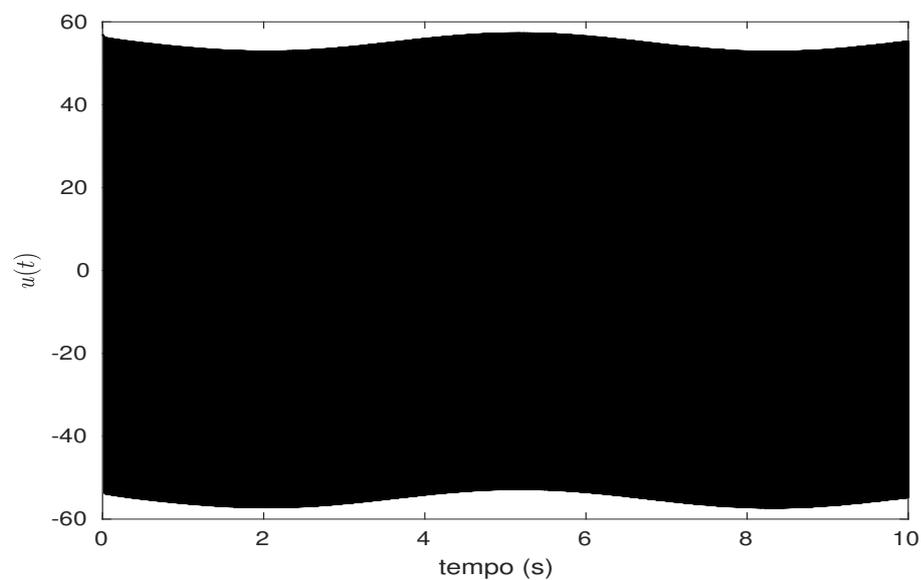


Figura 33 - Sinal de controle.

A Figura 34 foi gerada a partir da ampliação da Figura 33. Nela, é possível ver quando o sinal de controle $u(t)$ entra em modo deslizante.

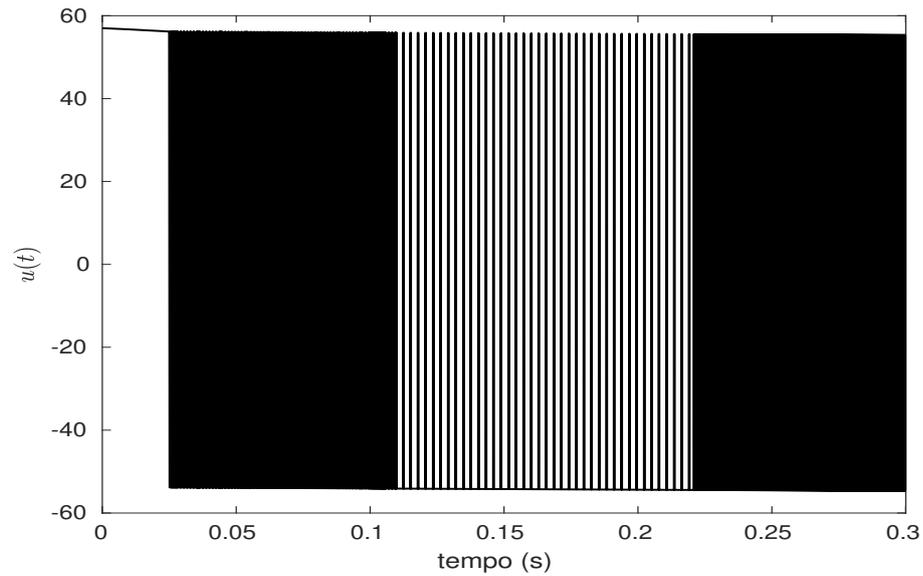


Figura 34 - Detalhe de quando o controle entra em modo deslizante.

A Figura 35 apresenta o sinal de saída da planta $\bar{y}(t)$, onde percebe-se o efeito da discretização. Na Figura 36 tem-se uma ampliação deste sinal em seus primeiro minuto e nela consegue-se verificar o efeito dos atrasos estocásticos nas amostragens, indicados pelas setas em verde (início da incidência dos atrasos) e vermelho (fim da incidência dos atrasos).

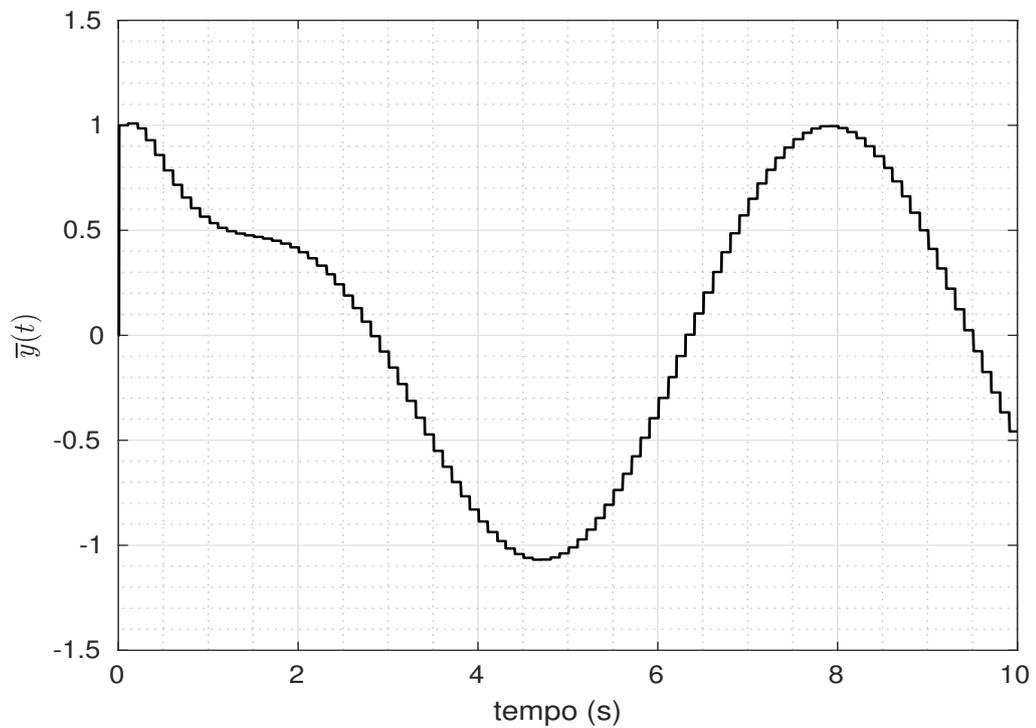


Figura 35 - Sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.

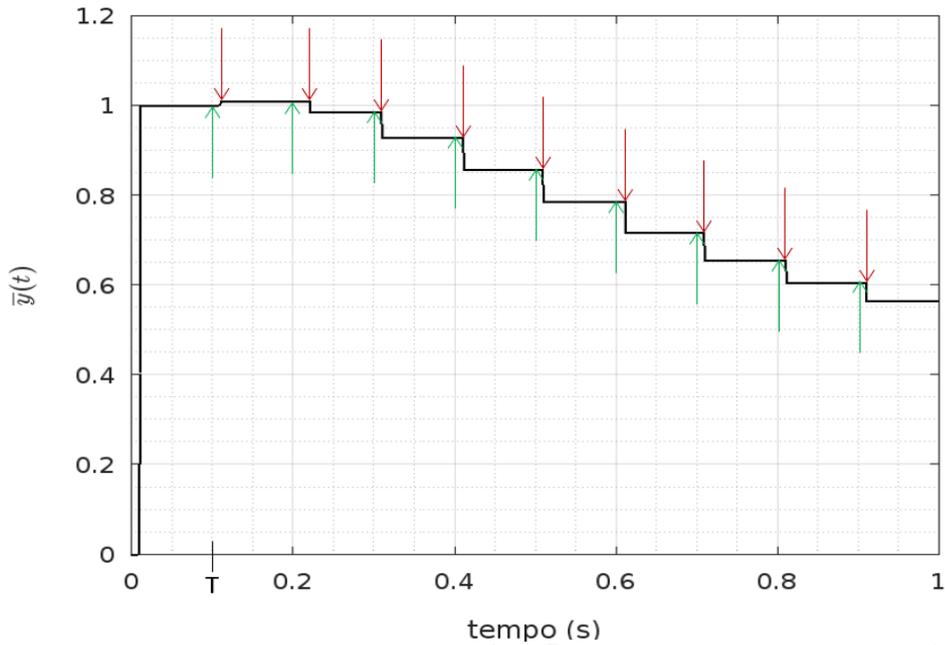


Figura 36 - Gráfico ampliado do sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.

Por fim, a Figura 37 confirma todas as conclusões já obtidas a partir dos gráficos anteriores e valida os objetivos esperados pela lei de controle para o sistema apresentado: a planta é estabilizada e a sua saída, $y(t)$ persegue a trajetória desejada, $y_d(t)$. Além disso, existe uma concordância entre os resultados apresentados nos gráficos anteriores, o teste de estabilidade quase certa para o sistema (4.1) apresentou valor menor que 1 para o raio espectral do segundo momento, sendo este valor igual a 0,0354.

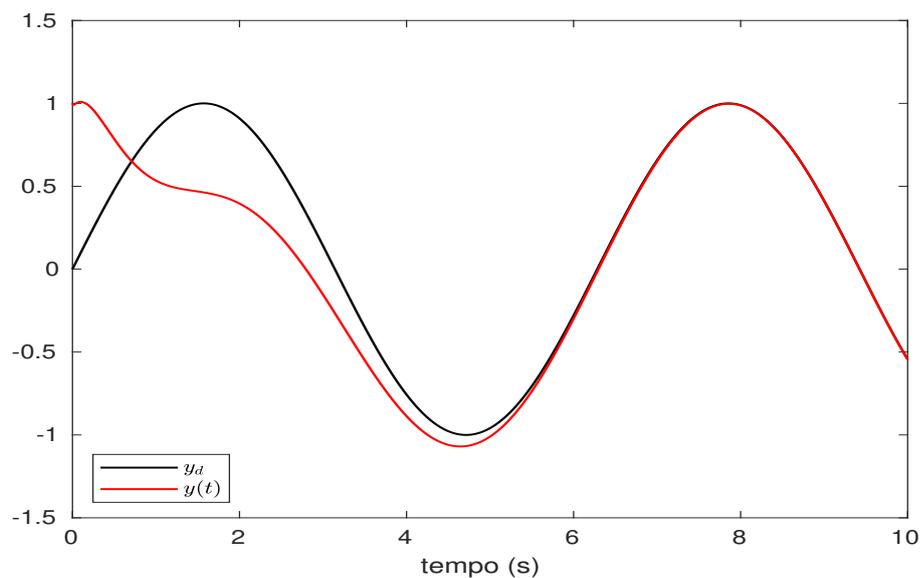


Figura 37 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$.

O teste executado a seguir consistiu em usar a saída da planta, ou seja, $\bar{y}(t)$ na entrada do controlador a fim de mostrar que os efeitos da discretização, somado aos atrasos estocásticos afetam o desempenho do controlador. Na Figura 38 estão os sinais de saída da planta e o sinal de saída desejável, na Figura 39 tem-se o sinal de controle e a Figura 40 apresenta o erro de estimação. Na primeira, verifica-se que não há uma convergência entre $y(t)$ e $y_d(t)$, além de $y(t)$ apresentar oscilações indesejáveis. Na segunda, constata-se que o desempenho do controlador foi comprometido. Já a terceira indica a não convergência do erro de estimação para zero. Portanto, fica comprovada a importância do observador projetado, ao compensar os atrasos e fornecer as estimativas em valores contínuos, fato importante para um bom funcionamento de um controlador por modo deslizante.

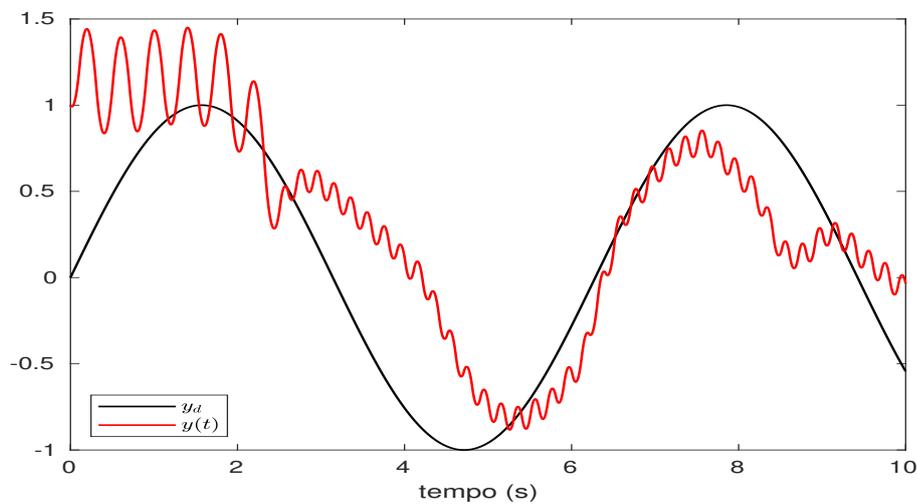


Figura 38 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$ sem o uso de observador.

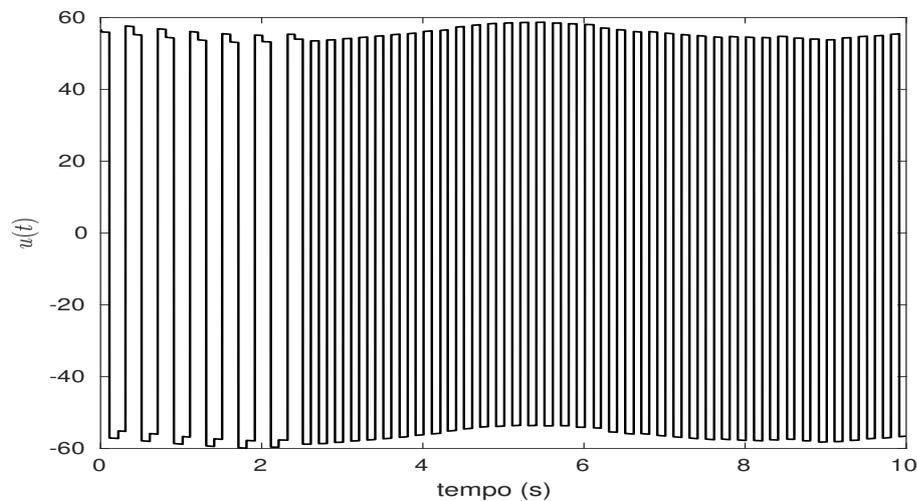


Figura 39 - Sinal de controle sem o uso de observador.

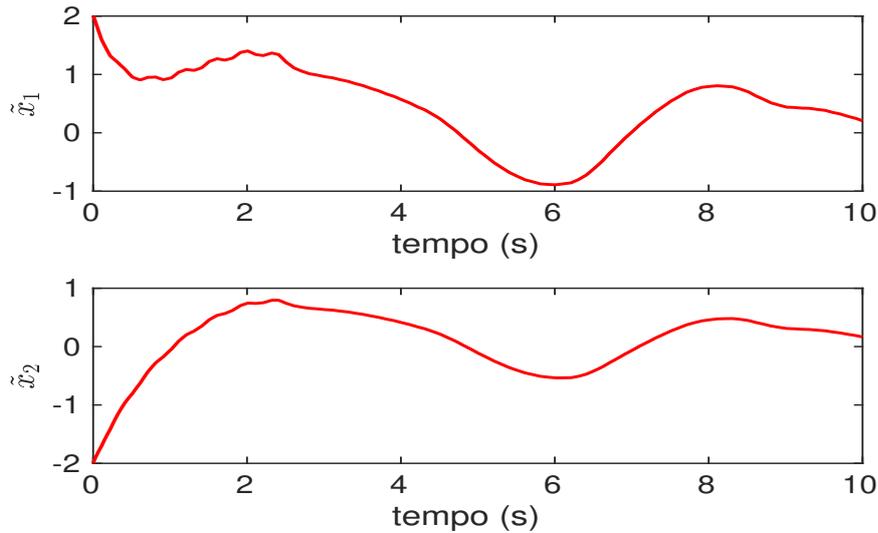


Figura 40 - Erro de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 quando usando o sinal $\bar{y}(t)$ na entrada do controlador.

No teste seguinte, a compensação de atraso no observador, ou seja, a amostragem de $\hat{y}(t)$ simultaneamente a de $y(t)$ foi negligenciada. A Figura 41 mostra o gráfico entre a saída da planta e a saída desejada e nela pode-se constatar que a falta da compensação no observador implica em uma convergência, seguido de um descolamento entre o valor ideal e estimado, e tal fenômeno se repete infinitamente se $t \rightarrow +\infty$. Com ajuda da Figura 42 pode-se ver que o erro se aproxima e se afasta do valor zero. Assim, esta simulação valida a importância do observador projetado, sobretudo sob as condições apontadas neste estudo.

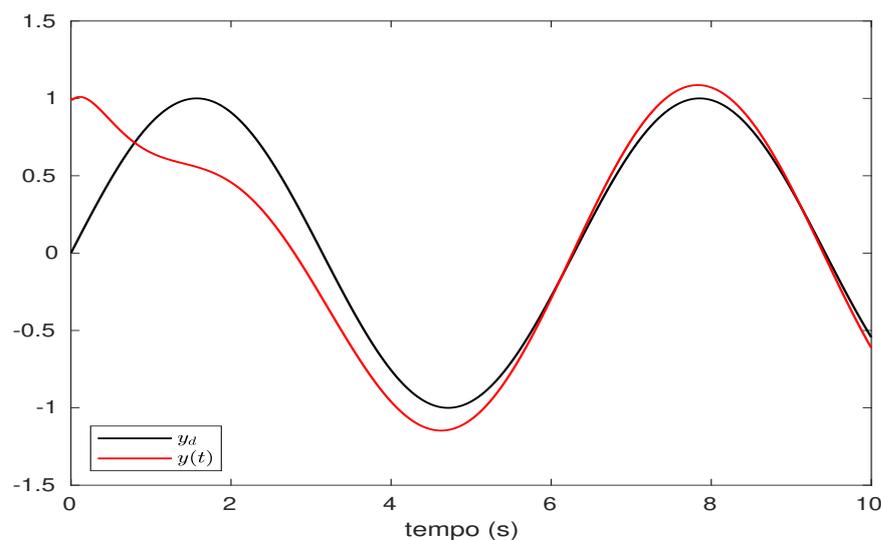


Figura 41 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$ quando não há compensação do atraso no observador.

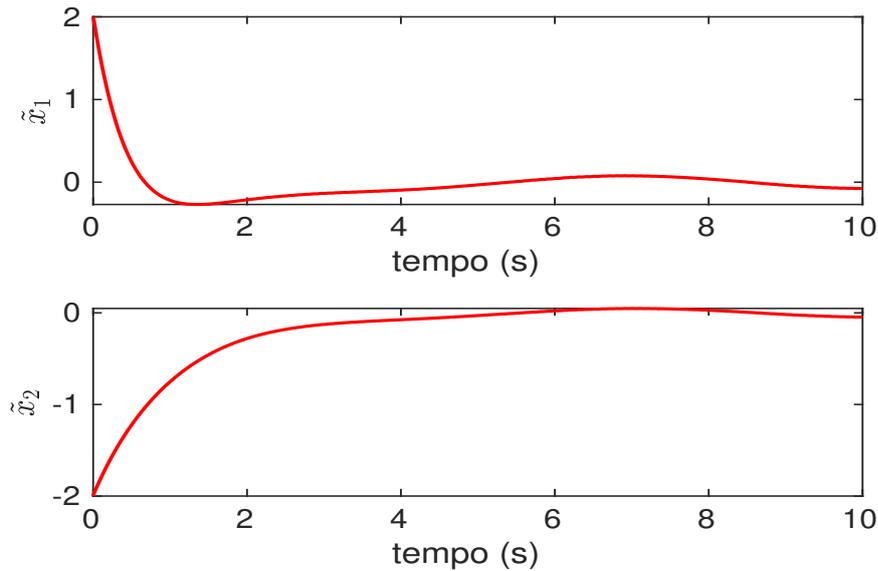


Figura 42 - Erro de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 quando a compensação do atraso no observador é retirada.

4.1.0.2 Resultados e Simulações Empregando o Protocolo Wi-Fi no modo TCP

Em (ANDRADE; CUNHA, 2018), o mesmo teste executado para mensurar os atrasos induzidos por uma rede ZigBee foi repetido com o mesmo objetivo para o protocolo Wi-Fi no modo TCP. Dessa forma, a Tabela 3 resume os dados coletados neste experimento e, em uma rápida comparação, apesar de possuir valor de atraso mínimo próximo ao do ZigBee, este protocolo possui um maior valor de atraso médio. Novamente, em um total de 11087 pacotes enviados, não se observou perdas de pacotes, e este era um fato esperado para este modo de operação do Wi-Fi.

Tabela 3 - Dados coletados e estatísticos para o experimento com o protocolo Wi-Fi no modo TCP. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.

Parâmetro	Módulo Wi-Fi RN-171XV
Atraso mínimo (em ms)	7,080
Atraso máximo (em ms)	410,424
Atraso médio (em ms)	21,863
Desvio Padrão (em ms)	18,929
Perda de Pacotes	0 %

Na Figura 43 segue histograma onde pode-se observar a distribuição da frequência dos atrasos de comunicação e na Figura 44 estão os atrasos medidos durante a execução da simulação. Em relação ao ZigBee, observa-se para este protocolo uma maior distribuição dos atrasos, com uma concentração que se inicia em aproximadamente 10 ms e uma queda após este valor, similar a uma exponencial.

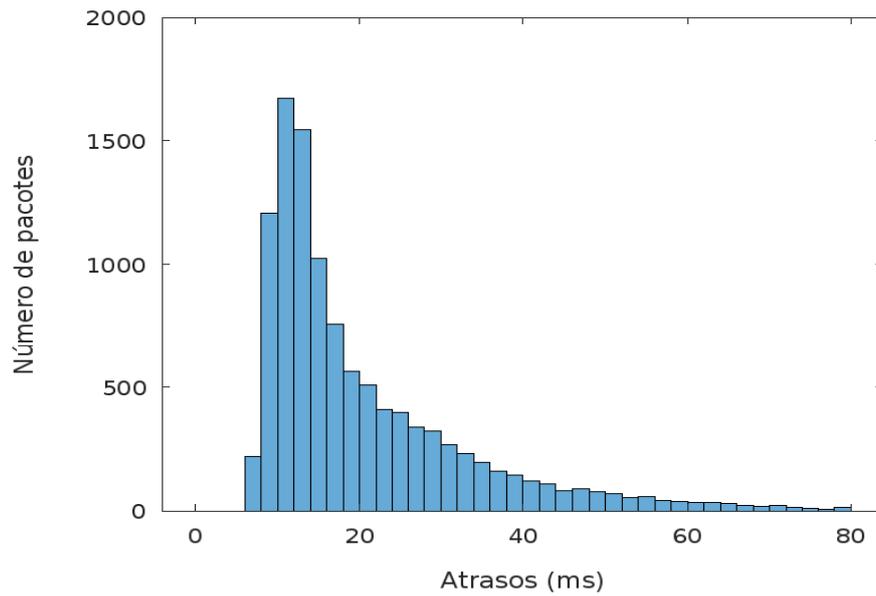


Figura 43 - Histograma dos atrasos medidos para o protocolo Wi-Fi no modo TCP. Fonte: (ANDRADE; CUNHA, 2018), com adaptações.

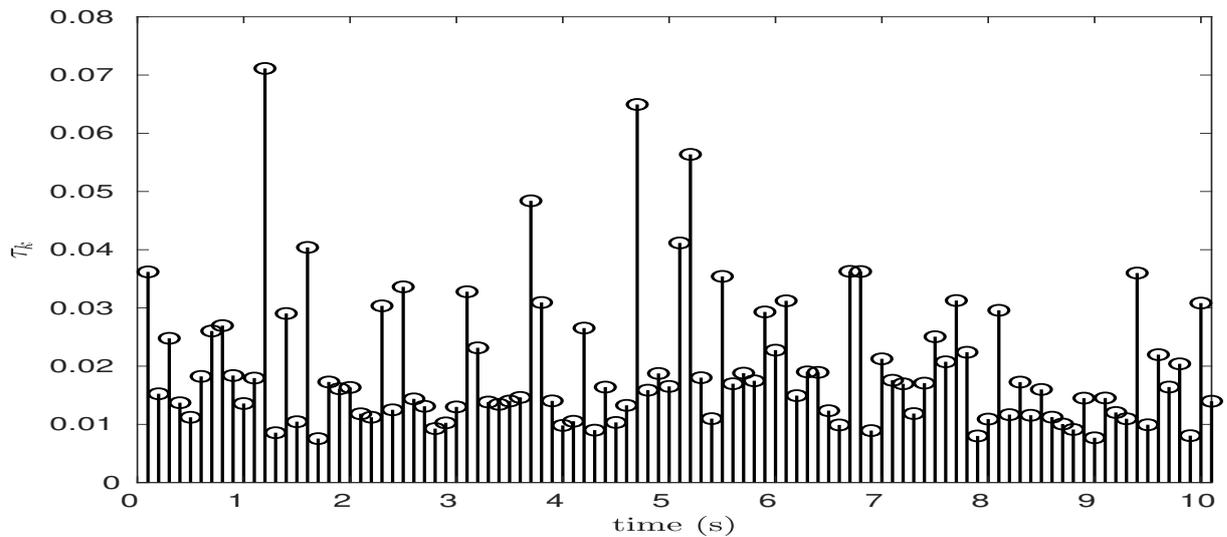


Figura 44 - Atrasos medidos durante a simulação.

Com base nas informações da Tabela 3 e na distribuição dos atrasos presentes na Figura 43 foi selecionado o valor de atraso máximo de 20 ms para o cálculo do ganho do observador, conforme método apresentado na seção 3.2.1.1. Assim, $\mathbf{L} = [4, 078 \ 3, 101]^T$. Já para o projeto do controlador, os parâmetros são: $\eta = 20$ e $c_1 = 1.1$. Portanto, a lei de controle projetada é:

$$u = [-\hat{x}_1 - 0, 1\hat{x}_2 + \dot{y}_d + \ddot{y}_d] - 20 \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (85)$$

A Figura 45 apresenta os erros de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 . Nela, pode-se observar que existe uma convergência entre a saída do observador e a saída da planta passado alguns instantes de tempo.

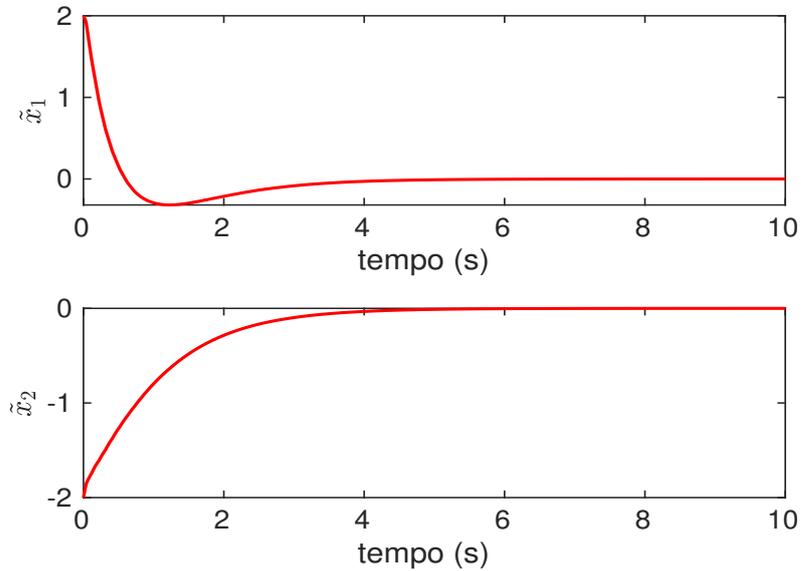


Figura 45 - Erros de estimação para as variáveis de estado x_1 e x_2 .

Na Figura 46 tem-se o sinal de controle $u(t)$ aplicado na entrada da planta e do observador de estados, gerado a partir da Equação (85). Já a Figura 47 trata-se de uma ampliação da Figura 46, de modo a tornar perceptível o instante em que o controlador entra no modo deslizante.

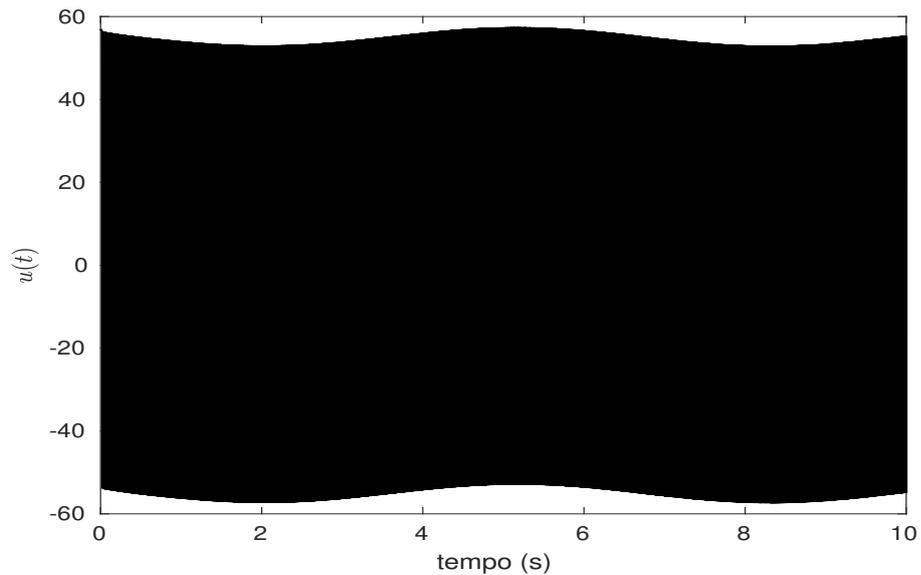


Figura 46 - Sinal de controle.

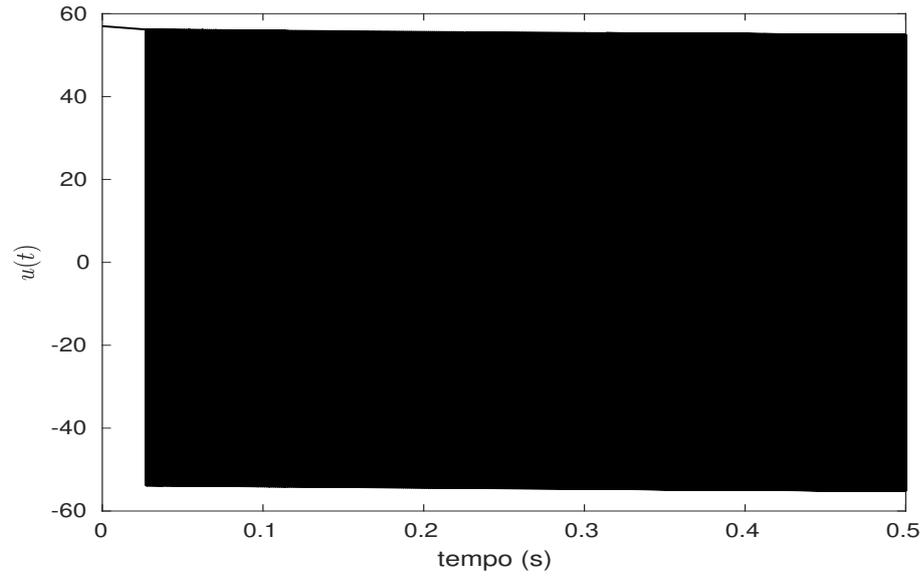


Figura 47 - Detalhe de quando o controle entra em modo deslizante.

A Figura 48 apresenta o sinal de saída da planta $\bar{y}(t)$, onde percebe-se o efeito da discretização e dos atrasos. Na Figura 49 pode-se notar com mais evidência os efeitos dos atrasos estocásticos, indicados pelas setas em verde (início da incidência dos atrasos) e vermelho (fim da incidência dos atrasos).

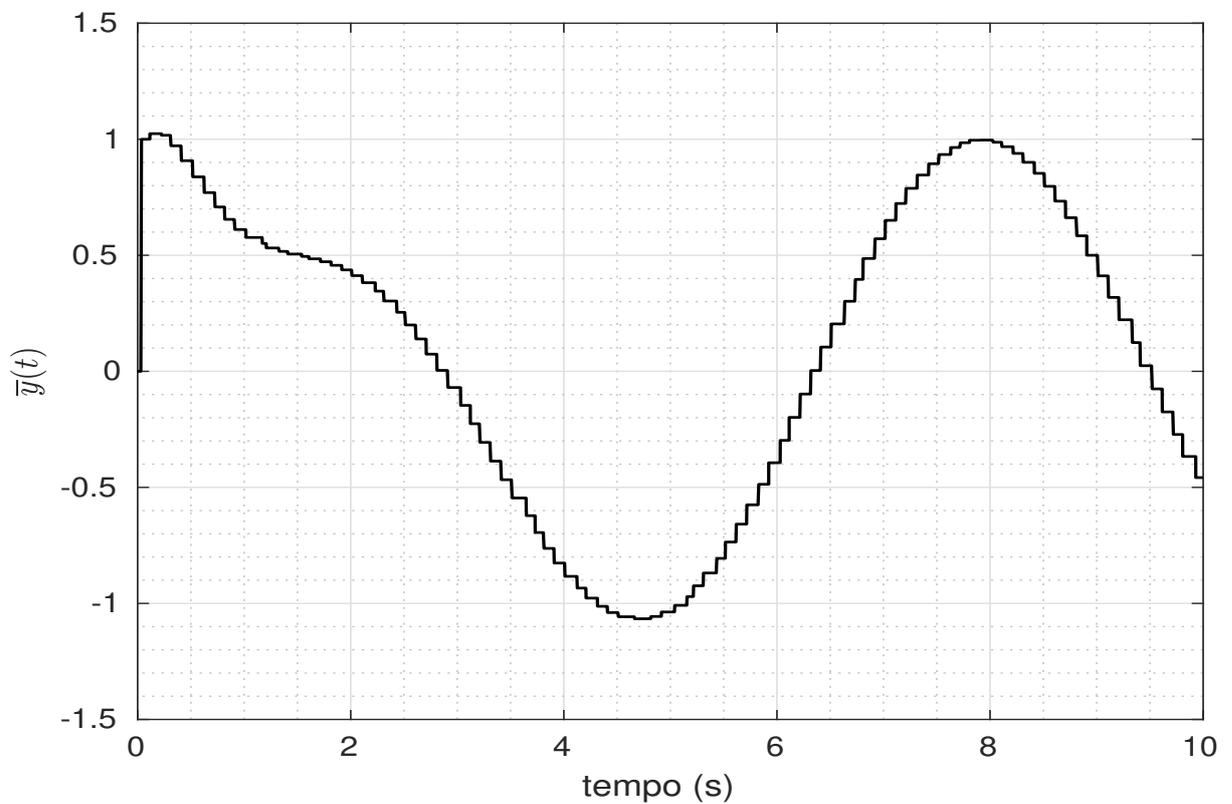


Figura 48 - Sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.

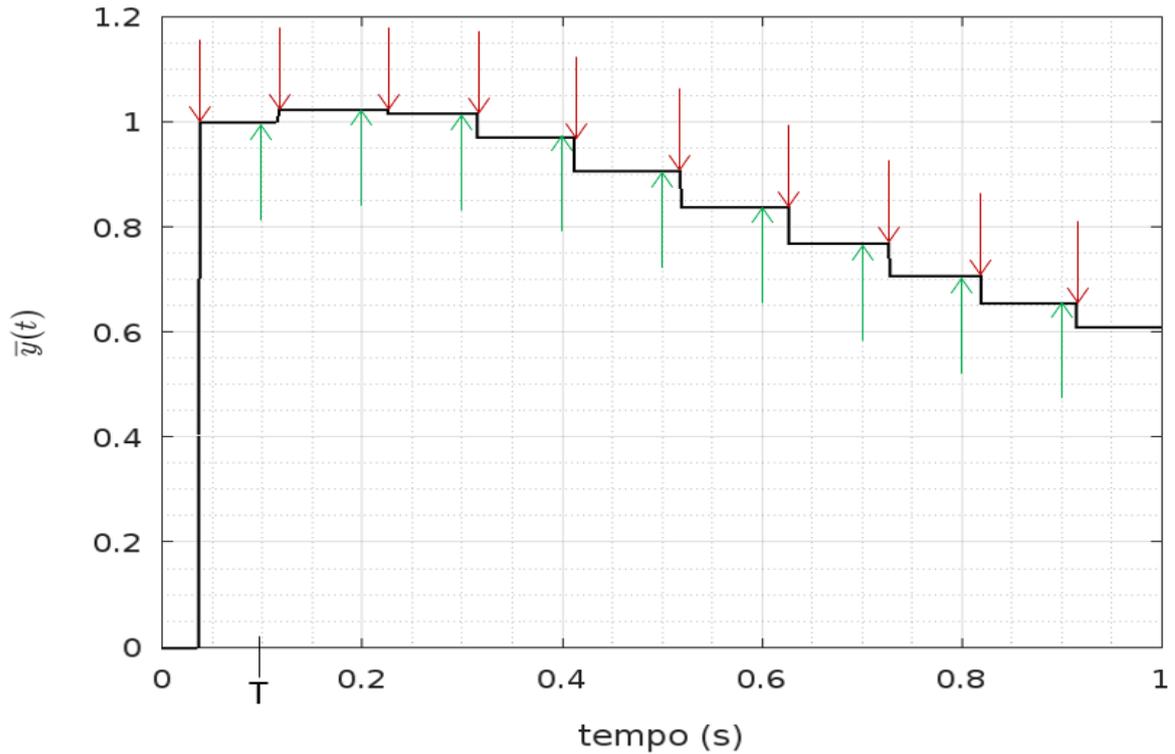


Figura 49 - Gráfico ampliado do sinal de saída da planta amostrado e sujeito a atrasos estocásticos.

Por fim, na Figura 50 tem-se a comprovação dos principais objetivos esperados para a lei de controle (85): estabilizar o sistema e permitir que a saída siga uma trajetória determinada. Além disso, tal Figura corrobora com conclusões já apontadas a partir dos gráficos anteriores, pois a convergência do observador de estados para erro de estimação igual a zero, leva a lei de controle a funcionar satisfatoriamente.

Novamente, tal como aconteceu nas simulações para o protocolo ZigBee, a falta o observador de estados efetuando a compensação dos atrasos e fornecendo as estimativas dos estados em tempo contínuo afeta e muito no desempenho do controlador, conforme Figura 51, onde tem-se o sinal de controle, Figura 52, contendo o sinal de saída da planta $y(t)$ comparando-o com a saída desejada $y_d(t)$ e na Figura 53, onde tem-se os erros de estimação que não convergem para zero.

De acordo com a Figura 51, nota-se uma tentativa em seguir a trajetória desejada, entretanto, o sinal de saída apresenta oscilações acentuadas.

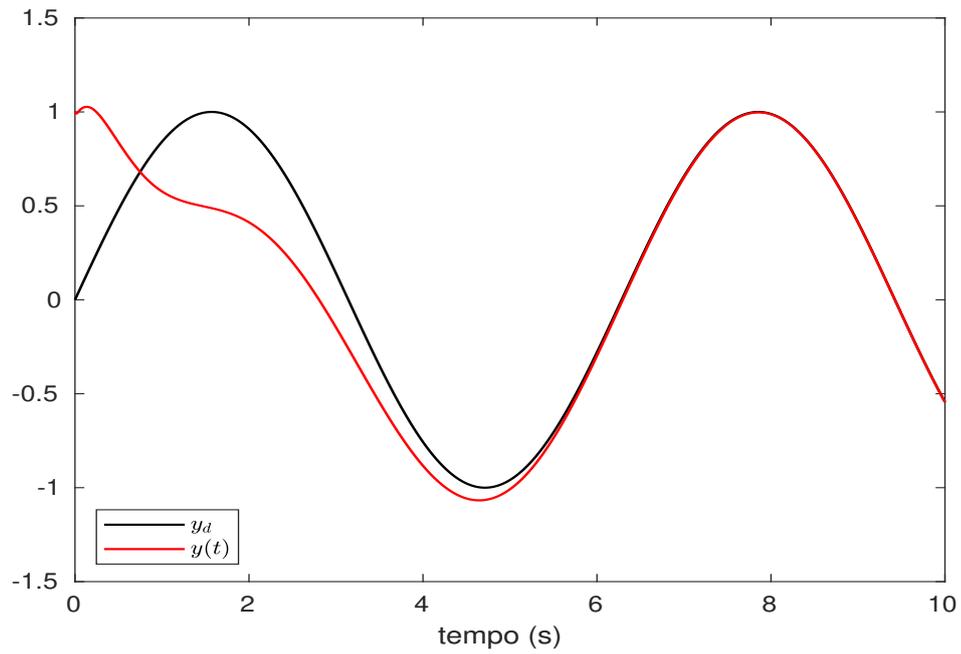


Figura 50 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$.

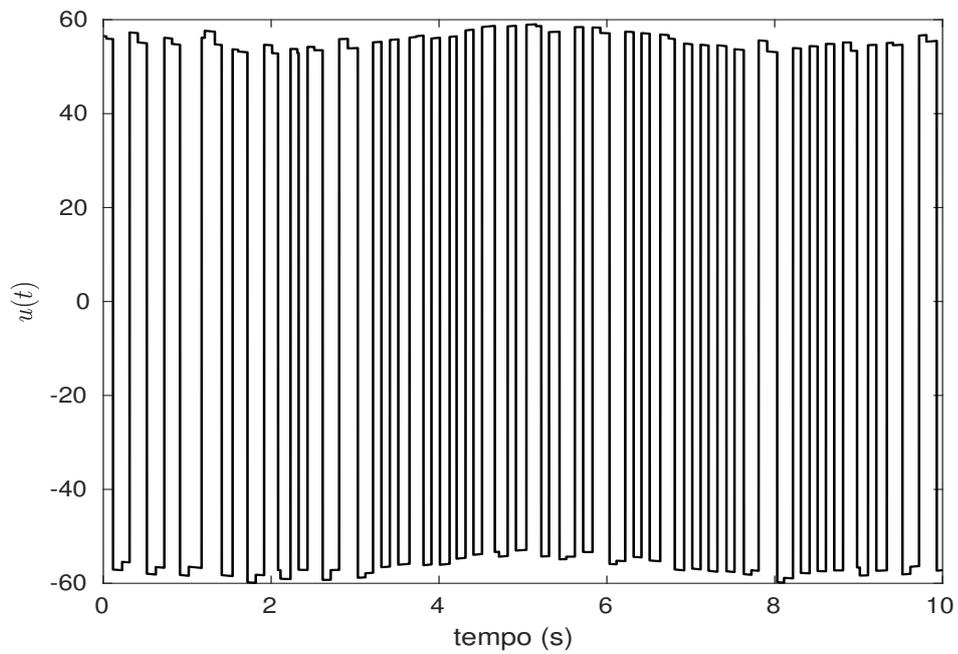


Figura 51 - Sinal de controle sem a compensação dos atrasos.

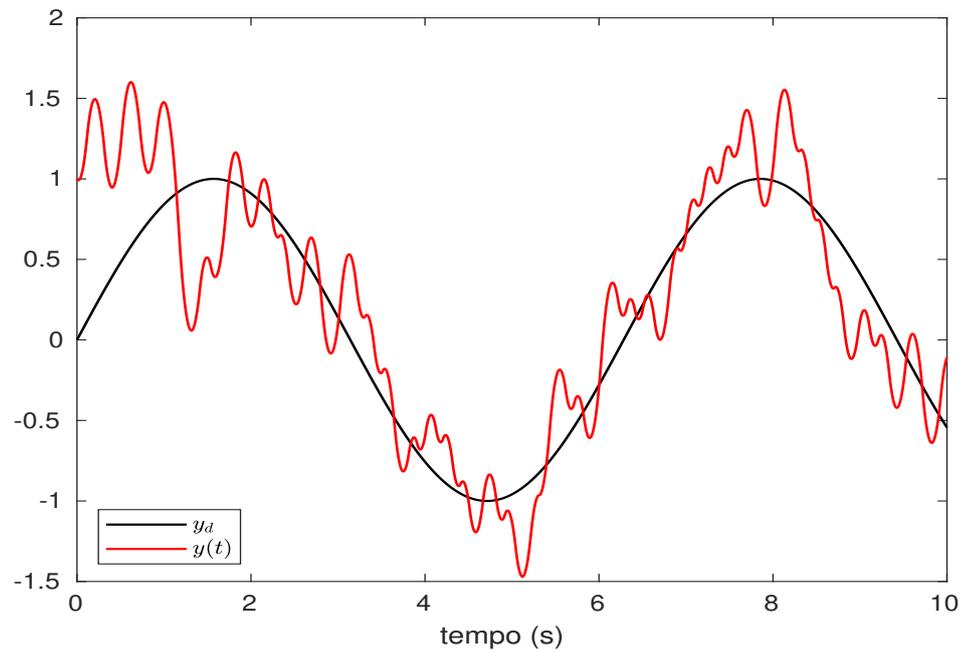


Figura 52 - Comparação entre o sinal de saída da planta $y(t)$ e o sinal de saída desejável $y_d(t)$ sem a compensação dos atrasos.

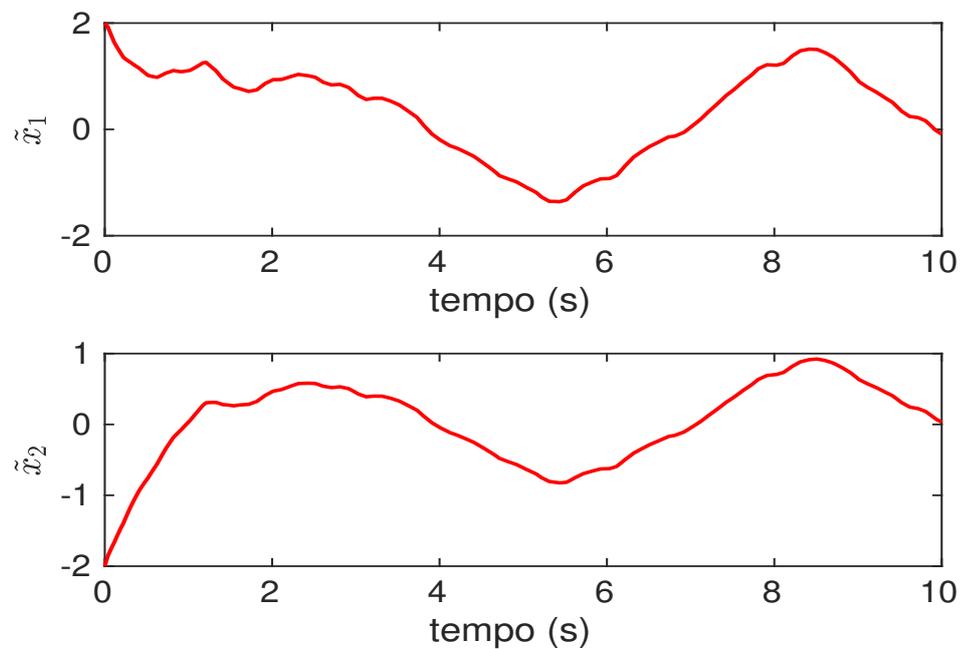


Figura 53 - Erro de estimação para as variáveis de estados x_1 e x_2 sem a compensação dos atrasos.

CONCLUSÃO

Nesta Dissertação, foi proposto o uso de observador de estados em um sistema de controle por modo deslizante onde existe um laço de comunicação sujeito a atrasos estocásticos de comunicação. A partir dos resultados das simulações apresentadas ao longo do Capítulo 4, conseguiu-se verificar que, nos casos onde houve a compensação, a lei de controle foi capaz de estabilizar uma planta instável e levar a sua saída a uma trajetória desejável. Desta forma, foi perceptível a importância de oferecer tratamento a este fenômeno comum em redes de automação, sobretudo nas redes sem fio.

Mesmo com toda a robustez que o controle por modo deslizante tem a oferecer, a presença dos atrasos demonstraram-se nocivos ao seu desempenho. Assim, o observador de estados que foi recomendado neste estudo mostrou-se capaz de compensar os atrasos e disponibilizar as suas estimativas, em tempo contínuo, para o controlador SMC. Isto posto, a estratégia apresentada foi capaz de permitir um laço em que existe o modo deslizante ideal, livre de *chattering*.

Ao empregar dois tipos de protocolos distintos nas simulações, o ZigBee e o Wi-Fi no modo TCP, cujas distribuição de atrasos de comunicação são conhecidas, pode-se acompanhar que a estratégia discutida neste trabalho tem potencial para ser aplicada em diferentes tipos de protocolos.

Em suma, a partir dos resultados mostrados neste trabalho, foi possível notar que os atrasos, quando não tratados, degradam o desempenho do controlador, levando a saída da planta a ter um comportamento não requerido, ou sequer ser capaz de haver a estabilização do sistema.

Trabalhos Futuros

Alguns tópicos importantes e não tratados neste trabalho podem ser interessantes de ser abordados em trabalhos futuros. Dentre eles:

- Avaliação do estudo apresentado sob a incidência de perturbações e/ou incertezas paramétricas.
- Extensão deste trabalho a sistemas não lineares, multivariáveis e com incertezas.
- Utilização da técnica abordada nesta dissertação em situações onde emprega-se outra estratégia de controle, como, por exemplo, realimentação de estado.
- Aplicação da técnica apresentada em um sistema de controle real.

REFERÊNCIAS

- ABHINAV, K.; MIJA, S. Observer based sliding mode control for 3 DOF helicopter system. *IFAC Proceedings Volumes*, p. 1–4, June 2021.
- ADRIANO, J. D.; ROSARIO, E. C. d.; RODRIGUES, J. J. Wireless sensor networks in industry 4.0: WirelessHART and ISA100.11a. *13th IEEE International Conference on Industry Applications*, p. 924–929, November 2018.
- AFIFI, G. et al. Dual protocol performance using WiFi and Zigbee for industrial WLAN. *24th Mediterranean Conference On Control And Automation*, p. 749–754, June 2016.
- AHMED-ALI, T. et al. PDE based observer design for nonlinear systems with large output delay. *System Control Letters*, v. 113, p. 1–8, March 2018.
- AIJAZ, A. High-performance industrial wireless: Achieving reliable and deterministic connectivity over IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, v. 1, p. 28–37, March 2020.
- AL-DABBAGH, A. W.; CHEN, T. Design considerations for wireless networked control systems. *IEEE*, v. 63, n. 9, p. 5547–5557, September 2016.
- ALBUQUERQUE, J. P. d. A.; FORTES, J. M. P.; FINAMORE, W. A. *Probabilidade, variáveis aleatórias e processos estocásticos*. 1^a. ed. [S.l.]: Interciência, 2008.
- ANDRADE, I. H. d.; CUNHA, J. P. V. S. d. Estabilidade de sistemas com realimentação de estado com atraso estocástico em redes sem fio. *XXII Congresso Brasileiro de Automática*, v. 1, n. 1, p. 1–8, Novembro 2018.
- ANDRIANOV, I.; SHATROV, A. Padé approximants, their properties, and applications to hydrodynamic problems. *Symmetry 2021*, v. 13, n. 10, p. 1–19, October 1869.
- ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*. 3rd. ed. [S.l.]: Dover Publications, 2011.
- BANERJI, S.; CHOWDHURY, R. S. On IEEE 802.11: Wireless LAN technology. *International Journal of Mobile Network Communications Telematics*, v. 3, n. 4, p. 1–19, August 2013.
- BARAMBONES, O. Sliding mode control strategy for wind turbine power maximization. *Energies*, v. 5, n. 7, p. 2310–2330, July 2012.
- BASS, R. F. *Stochastic Processes*. 1st. ed. [S.l.]: Cambridge, 2011.
- BERTELLI, G. P. M. *Controle Sobre Redes Industriais sem Fio: Uma Avaliação de Desempenho dos Padrões WirelessHart e ISA100.11a*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dezembro 2017.
- BHATTARAI, R. et al. Reduced-order state observer-based feedback control methodologies for doubly fed induction machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 3, p. 2845–2856, January 2018.

- BO, F. et al. The full-order state observer speed-sensorless vector control based on parameters identification for induction motor. *Measurement and Control*, v. 52, p. 202–211, March 2019.
- BONDAREV, A. G. et al. Sliding modes in systems with asymptotic state observers. *Autom. Remote Control*, v. 46, n. 6, p. 679–684, 1985. Pt. 1.
- CHEN, C.-T. *Linear System Theory and Design*. 3rd. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1999.
- CHEN, D.; NIXON, M.; MOK, A. *WirelessHART - Real-Time Mesh Network for Industrial Automation*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2010.
- CHIU, C.-S.; OUYANG, Y.-L.; KU, C.-Y. Terminal sliding mode control for maximum power point tracking of photovoltaic power generation systems. *Solar Energy*, v. 86, n. 10, p. 2986–2995, October 2012.
- CHUNG, T. D. et al. Effect of network induced delays on WirelessHART control system. *6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, p. 1–5, August 2016.
- CRISTI, R.; PAPOULIAS, F.; HEALEY, A. Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 15, n. 3, p. 152–160, July 1990.
- DAMAZO, G. A. *Controle com Modos Deslizantes Aplicado em Sistemas com Atraso e Acesso Somente à Saída*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Junho 2008.
- DANSA, M. M.; RODRIGUES, V. H. P.; OLIVEIRA, T. R. Regulação de glicemia através de um controlador bi-hormonal por modos deslizantes terminal não-singular. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, v. 1, p. 1–7, outubro 2019.
- DECARLO, R. A.; ŽAK, S. H.; MATTHEWS, G. P. Variable structure control of nonlinear multivariable systems: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 3, p. 212–232, 1988.
- DELBARI, M. M. et al. Time delay sensitivity analysis in a wireless network control system using LMI approach. *9th Asian Control Conference*, p. 1–4, June 2013.
- DING, S. Y.; LIU, J. L.; YUE, M. H. The use of ZigBee wireless communication technology in industrial automation control. *Wireless Communications and Mobile Computing*, p. 1–11, December 2021.
- DRAKUNOV, S. V. et al. The block control principle I. *Automation and Remote Control*, v. 51, n. 5, p. 601–609, 1990.
- DRAKUNOV, S. V. et al. The block control principle II. *Automation and Remote Control*, v. 51, n. 6, p. 737–746, 1990.
- EDWARDS, C.; SPURGEON, S. K. *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. [S.l.]: Taylor & Francis Ltd., 1998.
- FALUDI, R. *Building Wireless Sensor Networks*. 1st. ed. [S.l.]: O’Reilly, 2011.

- FATOOREHCHI, H.; GHORBANIAN, S. A. Sliding mode control for heartbeat electrocardiogram tracking problem. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, v. 2, n. 53, p. 265–272, 2019.
- FIALHO, A. B. *Automação Hidráulica - Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos*. 6^a. ed. [S.l.]: Érica, 2011.
- FLORENCIO, H. M. *Ferramenta para avaliação e interferência de parâmetros de redes industriais sem fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, março 2015.
- FOROUZAN, B. A. *Comunicação de Dados e Redes de Computadores*. 4^a. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008.
- FRIDMAN, E. *Introduction to Time-Delay systems: analysis and control*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2014.
- GALLOWAY, B.; HANCKE, G. P. Introduction to industrial control networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 15, n. 2, p. 860–880, July 2013.
- GAUTAM, M. K. et al. A comprehensive review of the evolution of networked control system technology and its future potentials. *Sustainability*, v. 13, p. 1–39, March 2021.
- GODOY, E. P.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. Applied simulation to evaluate the quality of control of networked control systems. *ICNSC*, p. 435–440, April 2010.
- GODOY, E. P.; SCORZONI, F.; PORTO, A. J. V. Evaluating serial zigbee devices for application in wireless networked control systems. *3rd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, p. 3176–3181, December 2012.
- GUTIÉRREZ, S. et al. Wireless ammeter based on zigbee for continuous monitoring of induction motors. *IEEE 39th Central America and Panama Convention*, p. 1–6, November 2019.
- HAMAYUN, M. T.; EDWARDS, C.; ALWI, H. *Fault Tolerant Control Schemes Using Integral Sliding Modes*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2016.
- HAN, X.; MA, X.; CHEN, D. Energy-balancing routing algorithm for WirelessHART. *IEEE Conference on Decision and Control*, p. 1–7, May 2019.
- HASSAN, S. M. et al. Adopting setpoint weighting strategy for wirelesshart networked control systems characterised by stochastic delay. *IEEE Access*, v. 5, p. 25885–25896, November 2017.
- HE, Q.; LIU, J. An observer for a velocity-sensorless VTOL aircraft with time-varying measurement delay. *International Journal of Systems Science*, v. 47, n. 3, p. 652–6615, March 2014.
- HENDERSON, H. V.; SEARLE, S. R. The vec-permutation matrix, the vec operator and kronecker products: a review. *Linear and Multilinear Algebra*, v. 9, p. 271–288, April 1981.
- HIERTZ, G. R. et al. The IEEE 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 1, p. 62–70, January 2010.

- HILLS, S.; YOERGER, D. A nonlinear sliding mode autopilot for unmanned undersea vehicles. *Proceedings of OCEANS'94*, v. 3, p. III/93–III/98, September 1994.
- HUANG, C.-I. et al. Smooth sliding mode control for constrained manipulator with joint flexibility. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 38, n. 1, p. 91–96, 2005.
- HUSSEIN, A. A.; SALIH, S. S.; GHASM, Y. G. Implementation of proportional-integral-observer techniques for load frequency control of power system. *Procedia Computer Science*, v. 109C, p. 754–762, May 2017.
- IOANNOU, P. A.; SUN, J. *Robust Adaptive Control*. 1st. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1996.
- ISLAM, Y. et al. Double integral sliding mode control of leukemia therapy. *Biomedical Signal Processing and Control*, v. 61, p. 1–20, August 2020.
- KADER, Z.; ZHENG, G.; BARBOT, J.-P. Impulsive observer design for linear systems with delayed outputs. *IFAC*, v. 50, n. 1, p. 1263–1268, July 2017.
- KHALIL, H. K. *Nonlinear Systems*. 2nd. [S.l.]: Prentice Hall, 1996.
- KUMAR, R.; RAY, A.; KANDE, M. WirelessHART device integration challenges and solutions in industrial automation. *IEEE 18th Conference on Emerging Technologies Factory Automation*, p. 1–4, September 2013.
- KUNUSCH, C.; PULESTON, P.; MAYOSKY, M. *Sliding-Mode Control of PM Fuel Cells*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2012.
- LEE, J.-S.; CHUANG, C.-C.; SHEN, C.-C. Applications of short-range wireless technologies to industrial automation: A ZigBee approach. *5th Advanced International Conference on Telecommunications*, p. 15–20, May 2009.
- LI, J.; NIU, Y. Output-feedback-based sliding mode control for networked control systems subject to packet loss and quantization. *Asian Journal of Control*, v. 23, n. 1, p. 1–14, July 2019.
- LIAN, F.-L.; MOYNE, J.; TILBURY, D. Performance evaluation of control networks: Ethernet, controlnet, and devicenet. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 21, n. 1, p. 66–83, February 2001.
- LIU, J. *Sliding Mode Control Using MATLAB*. 1st. ed. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- LIU, J.; WANG, X. *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems: Design, Analysis and MATLAB Simulation*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2012.
- LU, J. et al. A reduced-order enhanced state observer control of DC-DC buck converter. *IEEE Access*, v. 6, p. 56184–56191, September 2018.
- LUENBERGER, D. G. Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, v. 8, n. 2, p. 74–80, November 1964.
- LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. d. *Redes Industriais para Automação Industrial AS-I, PROFIBUS e PROFINET*. 1^a. ed. [S.l.]: Érica, 2012.

- LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. d. *Redes sem fio para automação industrial*. 1^a. ed. [S.l.]: Érica, 2013.
- MA, L. et al. Sliding mode control for a class of nonlinear discrete-time networked systems with multiple stochastic communication delays. *International Journal of Systems Science*, v. 42, n. 4, p. 661–672, 2011.
- MA, L.; ZHAO, D.; SPURGEON, S. K. Disturbance observer based discrete time sliding mode control for a continuous stirred tank reactor. *15th International Workshop on Variable Structure Systems*, p. 372–377, July 2018.
- MAASS, A. I. et al. Observer design for networked control systems implemented over WirelessHART. *IEEE Conference on Decision and Control*, p. 2836–2841, December 2018.
- MELLO, L. F. P. d. *Projeto de fontes chaveadas: teoria e prática*. 1^a. ed. [S.l.]: Érica, 2011.
- MICHELIN, T. J. *Análise do impacto da comunicação via rede flexray em sistemas de controle*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, março 2014.
- MILLÁN, Y. A.; VARGAS, F.; MOLANO FERNANDO, M. E. A wireless networked control systems review. *IX Latin American Robotics Symposium and IEEE Colombian Conference on Automatic Control*, p. 1–6, october 2011.
- MOHAMMED, A.; WANG, H.; TIAN, Y. New piecewise estimator observer for continuous time linear systems with sampled and delayed measurements. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 44, p. 7249–7260, August 2019.
- MONSIGNORE, F. *Sensoriamento de ambiente utilizando o padrão ZigBee*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, Fevereiro 2007.
- MORAES, C. C. D.; CASTRUCCI, P. D. L. *Engenharia de Automação Industrial*. 2^a. ed. [S.l.]: LTC, 2013.
- MOURA, E. F.; BARRO, C. M. *Os benefícios e vantagens do protocolo wireless ISA100*. 215. ed. [S.l.]: Controle & Instrumentação, 2016.
- MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 1, p. 29–47, January 2007.
- NECHIBVUTE, A.; MUDZINGWA, C. Wireless sensor networks for SCADA and industrial control systems. *International Journal of Engineering and Technology*, v. 3, n. 12, p. 1025–1035, December 2013.
- NIE, S. et al. Adaptive sliding mode control for electro-hydraulic position servo system of the elevation-balancing machine of artillery platform. *IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference*, p. 731–735, December 2018.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a. ed. [S.l.]: Pearson, 2011.

- OSUNA-IBARRA, L. P.; BARRAGAN, H. C.; LOUKIANOV, A. Predictor-based control for nonlinear mechanical systems with measurement delay. *IFAC*, v. 53, n. 2, p. 5783–5788, July 2020.
- PAN, L.; CHAO, C. Wind energy conversion systems analysis of pmsg on offshore wind turbine using improved SMC and extended state observer. *Renewable Energy*, v. 161, p. 149–161, December 2020.
- PARRA-VEGA, V.; HIRZINGER, G. Finite-time tracking for robot manipulators with singularity-free continuous control: a passivity-based approach. *IEEE Conference on Decision and Control*, v. 5, p. 5085–5090, December 2000.
- PASCOAL, A. J. A.; SOUZA, R. M. C. d.; OLIVIEIRA, H. M. d. Novas relações na matriz de transformação da transformada numérica de pascal. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 6, n. 1, Outubro 2017.
- PEARSON, A. E.; FIAGBEDZI, Y. A. An observer for time lag systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 34, n. 7, p. 775–777, July 1987.
- PENG, C. et al. A delay distribution based stability analysis and synthesis approach for networked control systems. *Journal of the Franklin Institute*, v. 346, n. 4, p. 349–365, May 2009.
- PERRUQUETTI, W.; BARBOT, J. P. *Sliding Mode Control in Engineering*. 1st. ed. [S.l.]: Marcel Dekker, 2002.
- PILLONI, A. et al. A sliding mode observer design for the average state estimation in large-scale systems. *IEEE Control Systems Letters*, v. 6, p. 632–637, May 2021.
- PINTO, H. L. d. C. P.; OLIVEIRA, T. R.; HSU, L. Sliding mode observer for fault reconstruction of time-delay and sampled-output systems – a time shift approach. *Automática*, v. 106, p. 390–400, August 2019.
- PLETS, D. et al. WiFi network planning and intra-network interference issues in large industrial warehouses. *10th European Conference On Antennas And Propagation*, p. 1–5, April 2016.
- QURESHI, K. N.; ABDULLAH, A. H. Adaptation of wireless sensor network in industries and their architecture, standards and applications. *World Applied Sciences*, v. 30, n. 10, p. 1218–1223, February 2014.
- RAMOS, J. d. S. B. *Instrumentação Eletrônica sem fio – Transmitindo Dados com Módulos XBee ZigBee e PIC16F877A*. 1^a. ed. [S.l.]: Érica, 2012.
- RAMOS, P. W. L. *Modeling and Control Design of a Tracked Mobile Robot for Surveillance Tasks*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, junho 2019.
- RAŠOVIĆ, I.; MIJANOVIC, Z. Proposal of an industrial communication system based on ZigBee technology. *24th International Conference on Information Technology*, p. 1–4, February 2020.

- RERKRATN, A. et al. Integration of WirelessHART devices into mitsubishi PLC for plant monitoring. *3rd International Conference on Control and Robotics Engineering*, p. 209–212, April 2018.
- REZHA, F. P.; SHIN, S. Y. Performance analysis of ISA100.11a under interference from an IEEE 802.11b wireless network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 2, p. 919–927, February 2014.
- RIBEIRO, J. M. d. S. *Controle com Modos Deslizantes em Sistemas Incertos com Atraso no Sinal de Controle*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Agosto 2006.
- RICHARD, J.-P. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, v. 39, n. 10, p. 1667–1694, October 2003.
- RIEGO, H. B. *Redes sem fio na indústria de processos: oportunidades e desafios*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, outubro 2009.
- ROSS, J. *O Livro do Wireless: um guia definitivo para Wi-Fi e redes sem fio*. 2^a. ed. [S.l.]: Alta Books, 2009.
- SADEGHPOUR, M.; OROSZ, G. Stability of continuous-time systems with stochastic delay. *IEEE*, p. 3708–3713, December 2016.
- SADIKIN, F.; DEURSEN, T. v.; KUMAR, S. A ZigBee intrusion detection system for IoT using secure and efficient data collection. *Internet of Things*, v. 12, p. 1–18, December 2020.
- SAMIJAYANI, O. N. et al. Hybrid ZigBee and wifi wireless sensor networks for hydroponic monitoring. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering*, p. 1–4, June 2020.
- SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 4, n. 1, p. 111–124, Janeiro 2018.
- SANTOS, R. M. d.; JESUS, G. Q. d.; PALMEIRA, E. S. Produto de kronecker para matrizes intervalares. *IV Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy*, p. 1–8, Novembro 2016.
- SARNIN, S. S. B. et al. Liquefied petroleum gas monitoring and leakage detection system using nodemcu ESP8266 and wi-fi technology. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 17, n. 1, p. 166–174, January 2020.
- SAUTER, T. The three generations of field-level networks - evolution and compatibility issues. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 11, p. 3585–3595, August 2011.
- SEABRA, J. C.; COSTA, M. A.; LUCENA, M. M. IoT based intelligent system for fault detection and diagnosis in domestic appliances. *IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics*, p. 205–208, September 2016.
- ŞEN, M.; KUL, B. IoT-based wireless induction motor monitoring. *XXVI International Scientific Conference Electronics*, p. 1–5, September 2017.

- SEURET, A. et al. Networked control using GPS synchronization. *American Control Conference*, p. 14–16, June 2006.
- SHAH, D. et al. Event-triggered non-switching networked sliding mode control for active suspension system with random actuation network delay. *15th International Workshop on Variable Structure Systems*, v. 23, n. 7, p. 1–14, July 2021.
- SHAH, D. H.; MEHTA, A. *Discrete-Time Sliding Mode Control for Networked Control System*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2018.
- SHAH, D. H.; MEHTA, A. *Discrete-Time Sliding Mode Control for Networked Control System*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2018.
- SHTESSEL, Y. et al. *Sliding Modes Control and Observation*. 1st. ed. [S.l.]: Springer, 2014.
- SHVAICHENKO, V. et al. The concept of integrating the fashion industry into the entertainment industry on the basis of the internet of things. *3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies*, p. 298–301, July 2019.
- SILM, H. et al. Distributed observers with time-varying delays. *IEEE*, v. 66, n. 11, p. 5354–536, November 2021.
- SILVANI, X. et al. IEEE 802.11 wireless sensor network for hazard monitoring and mitigation. v. 114, p. pages3545–3574, August 2022.
- SLOTINE, J. Sliding controller design for nonlinear systems. *Int. J. Contr.*, v. 40, p. 421–434, 1984.
- SLOTINE, J.; SASTRI, S. Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators. *Int. J. Contr.*, v. 38, p. 465–492, 1983.
- SMITH, O. Close control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, v. 53, n. 5, p. 217–219, 1957.
- SONG, J. et al. WirelessHart: Applying wireless technology in real-time industrial process control. *International Journal of Systems Science*, p. 1–6, April 2008.
- SUN, S.; CUI, W.; ZHENG, J. Robust sliding mode control for stochastic uncertain discrete systems with two-channel packet dropouts and time-varying delays. *Sensors 2022*, v. 22, n. 5, p. 1–18, March 2022.
- TAGNE, G.; TALJ, R.; CHARARA, A. Higher-order sliding mode control for lateral dynamics of autonomous vehicles, with experimental validation. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, p. 678–683, June 2013.
- TIAN, Y. et al. A new sliding mode observer for systems with continuous-time models and discrete-time measurements. *Chinese Control and Decision Conference*, p. 5370–5373, May 2017.
- TUGAL, H. et al. Sliding mode controller for positioning of an underwater vehicle subject to disturbances and time delays. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 3034–3039, May 2022.

- UTKIN, V. Variable structure systems: Present and future. *Automation and Remote Control*, v. 44, n. 9, p. 1105–1120, 1983.
- UTKIN, V.; GULDNER, J.; SHI, J. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. [S.l.]: Taylor & Francis Ltd., 1999.
- UTKIN, V.; LEE, H. The chattering analysis. *Proc. Power Electronics and Motion Control Conf.*, p. 2014–2019, September 2006.
- UTKIN, V. I. *Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems*. Moscow: MIR Publishers, 1978.
- UTKIN, V. I. *Sliding Modes in Control and Optimization*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1992.
- VARSHNEY, U. The status and future of 802.11-based WLANs. *Computer*, v. 36, n. 3, p. 102–105, June 2003.
- WANASINGHE, T. R. et al. The internet of things in the oil and gas industry: A systematic review. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 9, p. 8654–8673, May 2020.
- WU, T. et al. An autonomous wireless body area network implementation towards IoT connected healthcare applications. *IEEE Access*, v. 5, p. 11413–11422, June 2017.
- XIA, K. et al. A real-time monitoring system based on ZigBee and 4g communications for photovoltaic generation. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, v. 6, n. 1, p. 52–63, June 2020.
- XING, H.; PLOEG, J.; NIJMEIJER, H. Compensation of communication delays in a cooperative ACC system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 2, p. 1177–1189, February 2020.
- XINRAN, Z.; CHAO, L.; YINGDUO, H. Expectative modeling of wide-area damping networked control systems with long stochastic time delay. *25th Chinese Control and Decision Conference*, p. 3103–3108, May 2013.
- YAN, C.; DING, S.; YANG, R. Sliding mode control for discrete-time networked control systems based on the NPC scheme. *Sensors 2022*, v. 22, n. 5, p. 536–540, October 2020.
- YASHIRO, T. et al. An internet of things (IoT) architecture for embedded appliances. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference*, p. 314–319, August 2013.
- YATES, R. D.; GOODMAN, D. J. *Probabilidade e Processos Estocásticos: Uma Introdução para Engenheiros Eletricistas e da Computação*. 3^a. ed. [S.l.]: LTC, 2017.
- YAVARI, A. et al. Internet of things milk spectrum profiling for industry 4.0 dairy and milk manufacturing. *International Conference on Information Networking*, p. 342–347, January 2020.
- YU, B.; SHI, Y.; LIN, Y. Discrete-time - output tracking control of wireless networked control systems with markov communication models. *Wireless Communications And Mobile Computing*, v. 11, n. 8, p. 1107–1116, October 2009.

ZAHMATI, A. S.; FERNANDO, X.; KOJORI, H. Transmission delay in wireless sensing, command and control applications for aircraft. *4th Annual Caneus Fly by Wireless Workshop*, p. 1–4, 2011.

ZHANG, H. et al. *gps* path tracking control of military unmanned vehicle based on preview variable universe fuzzy sliding mode control. *Machines*, v. 9, n. 32, p. 1–19, November 2021.

ZHAO, D. Z.; LIANG, H.; SPURGEON, S. K. Robust adaptive terminal sliding mode control for dynamic positioning of a semi-submersible offshore platform. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, v. 41, n. 5, p. 1361–1372, June 2018.

ZHOU, W.; WANG, Y.; LIANG, Y. Sliding mode control for networked control systems: A brief survey. *ISA Transactions*, v. 124, p. 249–259, May 2021.