

Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Projeto e análise de estabilidade de sistemas reais de controle via redes

Ana Paula Batista

Belo Horizonte, 19 de Fevereiro de 2014

Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Projeto e análise de estabilidade de sistemas reais de controle via redes

por

Ana Paula Batista

Tese submetida à Banca Examinadora
designada pelo Colegiado do Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Minas Gerais, como requisito para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Fábio Gonçalves Jota, Ph.D - DELT/UFMG

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Projeto e análise de estabilidade de sistemas reais de controle via redes

Ana Paula Batista

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada por:

Prof. Fábio Gonçalves Jota, Ph.D - DELT/UFMG
Orientador

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr. - UFSC
Examinador

Prof. Valter Júnior de Souza Leite, Dr. - CEFET-MG
Examinador

Prof. Márcio Fantini Miranda, Dr. - UFMG
Examinador

Prof. Fernando de Oliveira Souza, Dr. - UFMG
Examinador

Prof. Maria Auxiliadora Muanis Persechini, Dr. - UFMG
Examinador

Belo Horizonte, 19 de Fevereiro de 2014

Agradecimentos

Sou imensamente grata a meu orientador, Prof. Fábio Gonçalves Jota, pelas inúmeras oportunidades de aprendizado ao longo destes anos, que com a sua competência e dedicação ao conhecimento conduziu este trabalho da melhor forma possível. Obrigada pelo apoio, compreensão, confiança e disponibilidade.

Sou muito grata também, a toda equipe do projeto CMUF-R, aos professores Patrícia Romeiro da Silva Jota, Maria Eugênia de Almeida Freitas e Euler Cunha Martins e a todos os alunos que trabalharam no CMUF-R, meu agradecimento especial ao aluno Guilherme Oliveira por toda ajuda.

Agradeço ao CEFET-MG pela liberação de minhas atividades profissionais e aos colegas do DEE e do CPEI por incentivarem esta capacitação. Agradeço também aos colegas do LCPI pela companhia e boas conversas.

Agradeço à CEMIG, pelo apoio financeiro e recursos disponibilizados no projeto P&D 263 CEMIG-ANEEL e ao Eng^o Matheus Herzog gerente do projeto.

Agradeço também aos membros da banca examinadora Prof. Valter Júnior de Souza Leite, Prof. Alexandre Trofino Neto, Prof. Márcio Fantini Miranda, Prof. Maria Auxiliadora Muanis Persechini e Prof. Fernando de Oliveira Souza por suas contribuições para o aprimoramento do trabalho.

E, finalmente, agradeço à minha família, em especial à minha mãe e a querida Aline por tornar meus finais de semanas mais alegres. Aos meus irmãos Adriana e Ronaldo pelo exemplo e incentivo à carreira acadêmica, e também pelos conselhos e consolos. Ao Amauri, sou imensamente grata pelo apoio e compreensão ao longo desta jornada e, sobretudo, por me fazer muito mais feliz.

Resumo

Em um sistema de controle com a malha fechada via uma rede de comunicação de dados mais conhecido pela sigla NCS (acrônimo de “Networked Control System”) atrasos são introduzidos na transmissão de mensagens e consequentemente na execução dos sinais de controle. Os atrasos em NCSs sob redes de acesso aleatório, como a Internet, são fortemente dependentes das condições de tráfego na rede e apresentam parâmetros estatísticos variantes no tempo, por exemplo, tempo médio e variância. Análises de atrasos medidos em NCSs reais, implementados sob a Internet, revelam que uma única distribuição de probabilidade não é capaz de representar o comportamento que apresentam. A ocorrência de atrasos variantes provoca variações paramétricas e incertezas na representação da dinâmica da malha, o que aumenta a complexidade de análise e síntese dos controladores, bem como a dificuldade de simular as condições reais através de algoritmos computacionais. As ferramentas de análise e simulação em geral apresentam limitações quanto à incorporação dos fenômenos reais presentes em NCSs. Ademais, podem levar a condições de síntese extremamente conservadoras, no sentido de comprometer o desempenho para garantia da estabilidade em qualquer condição supostamente factível considerando os limites de atrasos estabelecidos. Nesta Tese de Doutorado, o efeito da variação da distribuição dos atrasos e as regiões mais prováveis de estabilidade em sistemas de controle em redes, sujeitos a atrasos variantes, são analisados. Foram avaliadas ferramentas de análise e síntese disponíveis na literatura e, devido a algumas limitações encontradas para implementação prática no estudo de caso real, uma nova metodologia de análise é proposta. A metodologia, baseada no método de Monte Carlo e análise de resposta temporal, fornece condições para análise dos efeitos das variações dos atrasos e índices (que podem ser utilizados como parâmetros na síntese dos controladores) como, por exemplo, os limites máximos de atrasos variantes suportados pelo NCS sujeito a determinadas distribuições de atrasos. A metodologia proposta, quando comparada a outras encontradas na literatura (tal como, por exemplo, um método baseado em modelo sobreaproximado e abordagem politópica com limitante em norma), apresenta resultados de simulação que evidenciam limites de estabilidade com menor grau de conservadorismo. A metodologia de análise proposta foi também aplicada em plantas físicas reais. Foram implementados NCSs reais em três plantas físicas distintas com constantes de tempo que variam de milissegundos a horas, incluindo processos com restrições que exigem soluções de controle diferenciadas. Diferentes estratégias de controle foram propostas, implementadas e avaliadas. O estudo revelou que o uso de Preditores de Smith Adaptativos para

compensação dos efeitos dos atrasos traz melhorias significativas no desempenho da malha fechada, mas requer que as mensagens da rede possuam estampas de tempo para que os valores efetivos dos atrasos possam ser determinados. O estudo também mostra que a Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle é bastante atraente para implementação de NCS em sistemas em que as mensagens não possuem estampas de tempo. Um dos estudos de caso analisados foi o de um equipamento de refrigeração comercial de pequeno porte em que, com a estratégia de controle proposta e implementada via rede denominada de Controle Modulado com Restrição, foi possível alcançar ganhos energéticos expressivos (da ordem de 34%) e também uma redução significativa nas oscilações de temperatura interna. Os diversos resultados experimentais apresentados (centenas de horas de ensaios e um número superior a um milhão de amostras de dados coletadas em NCSs reais) reforçam a tese de que é necessário considerar de alguma forma as estatísticas dos atrasos para análise de sistemas de controle em rede. Este estudo alerta para a necessidade de realizar mais investigações sobre as representações das estatísticas dos atrasos e seus efeitos sobre o projeto do sistema de controle em rede real.

Palavras-Chave: Sistemas de controle em rede, NCSs reais, regiões mais prováveis de estabilidade, estatísticas dos atrasos.

Abstract

In a control system with a loop closed via a data communication network, better known by the acronym NCS (which stands for “Networked Control System”), delays are introduced in the transmissions of messages and consequently in the execution of the control signals. The delays in NCSs, closed over random access networks, as the Internet, are highly dependent on the network traffic conditions and present time-varying statistical parameters, e.g., average time and variance. Analyses of actual delays measured in real NCSs, implemented over the Internet, reveal that a single probability distribution is not able to represent the observed behavior. The occurrence of variable delays causes parametric variations and uncertainties in the representation of the dynamics of the loop, which increase the complexity of the analysis and synthesis of the controllers, as well as the difficulty of simulating the real conditions by means of computational algorithms. The analysis and simulation tools, in general, have limitations on the incorporation of real phenomena present in the NCS. In addition, they can lead to extremely conservative synthesis conditions, to the point of jeopardizing the performance for ensuring stability guarantee in any supposedly feasible condition given the established limits of delays. In this PhD Dissertation, the effects of the delays distribution and the most likely regions of stability in NCSs, subject to variable delays are analyzed. Some synthesis and analysis tools available in the literature have been evaluated and, due to some limitations for practical implementation to a real case, a new analysis methodology is proposed. Based on the Monte Carlo method and on the analysis of time response, it provides conditions for analysis of the effects of the variable delays and the indices (which can be used as parameters in the controller synthesis), e.g., the maximum variable delay supported by the NCS with certain delay distributions. This methodology, when compared to counterparts found in the literature (such as, for example, the over-approximation method based on polytopic and norm limited approaches), presents results with lesser degrees of conservatism. The proposed method has also been applied for analysis of physical plants. NCSs were implemented in three distinct physical plants with time constants ranging from milliseconds to hours, including processes with restrictions that require more elaborated control solutions. Different control strategies have been proposed, implemented and evaluated. This study revealed that the use of Adaptive Smith Predictors to compensate for the effects of delays brings significant performance improvements, but requires that the network messages have timestamps so that the effective values of the delays can be determined. The study also showed that the strategy referred

to as Explicit Compensation of the Control Signal is very attractive for implementation of NCSs in systems where the messages do not have timestamps. A commercial refrigeration equipment has been one of the case studied, in which, by using the proposed control strategy, implemented over the CAN-Internet network, called Modulated Control with Restriction, it has been possible to achieve significant energy savings (around 34%) and also a significant reduction in internal temperature fluctuations. The many experimental results presented (hundreds of execution hours and more than one million of data samples collected in real NCS) confirm the thesis that it is necessary to consider the delay statistics for the analysis of networked control systems. This study emphasizes the need for more research on the representations of the statistics of the delay and its effect on the design of real networked control systems.

Keywords: Networked control systems, real NCSs, stability of NCSs, statistics of time-delays.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	O Problema de Sistemas de Controle em Rede	2
1.2	Efeito dos Atrasos na Malha Fechada	8
1.3	Motivação	10
1.4	Objetivos	11
1.5	Contribuição	11
1.6	O Método de Monte Carlo Aplicado à Análise de Sistemas Es- tocásticos	13
1.7	Organização da Tese	16
2	Estado da arte em NCS: Uma Análise Crítica	18
2.1	Visão Geral	18
2.2	Ferramentas de Análise e Projeto de NCSs	21
2.3	Considerações Finais do Capítulo	33
3	O Problema de Controle em Rede em Sistemas Reais	35
3.1	Introdução	36
3.2	Comportamento dos Atrasos em NCSs Reais sob Redes de Acesso Aleatório	37
3.2.1	Atrasos em Redes IP	37
3.2.2	Avaliação dos Atrasos em um NCS Real	41
3.3	Aspectos Práticos da Implementação de NCSs	50
3.3.1	A Plataforma NCS-CMUF	51

3.3.2	Controle Remoto na Plataforma NCS-CMUF	56
3.3.3	Questões Relativas ao Sincronismo	59
3.3.4	Controladores Padrões da Plataforma NCS-CMUF Utilizados	62
3.4	Representação e Análise de NCSs	65
3.5	Considerações Finais do Capítulo	67
4	Descrição dos Sistemas Usados e Projeto dos Controladores	68
4.1	Descrição dos Sistemas Usados	68
4.1.1	Processo Óptico	69
4.1.2	Processo Térmico	72
4.1.3	Câmara de Refrigeração	75
4.2	Projeto dos Controladores	78
4.2.1	Descrição dos Controladores	79
4.2.2	Ajuste dos Parâmetros dos Controladores	84
4.3	Considerações Finais do Capítulo	87
5	Análise de NCSs: Efeitos dos Atrasos nas Regiões mais Prováveis de Estabilidade	89
5.1	Descrição do Método Proposto	90
5.2	Estudo Simulado	94
5.3	Estudo do Comportamento de um NCS aplicado a um Sistema Simples: Filtro Passa Baixa de Primeira Ordem	104
5.4	Aplicação a Sistemas Físicos Reais	106
5.4.1	Processo Óptico	107
5.4.2	Processo Térmico	110
5.4.3	Câmara de Refrigeração	113
5.5	Considerações Finais do Capítulo	116
6	Resultados Experimentais	122
6.1	Malha de Luminosidade	122
6.1.1	Ensaio com Atrasos Naturais da Rede	123

6.1.2	Ensaaios com Atrasos Adicionais (com Distribuição Uniforme, Exponencial e Gaussiana)	133
6.1.3	Simulação da Malha de Luminosidade	149
6.1.4	Considerações sobre a Malha de Luminosidade	154
6.2	Malha de Temperatura do Forno	155
6.2.1	Ensaaios com Atrasos Naturais da Rede	156
6.2.2	Ensaaios com Atrasos Adicionais Emulados	162
6.3	Malha de Temperatura de uma Câmara de Refrigeração	168
6.4	Considerações Finais do Capítulo	177
7	Conclusões	181
7.1	Conclusões Gerais	181
7.2	Contribuições da Tese	185
7.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	188
A	Questões de Representação de NCS	191
A.1	Representações de NCS: Modelo Discreto Superamostrado e em Espaço de Estados com Vetor Aumentado	193
A.1.1	Modelo Discreto Superamostrado	193
A.1.2	Modelo em Espaço de Estados com Vetor Aumentado	202
A.1.3	Validação dos Modelos em um NCS Real	217
A.2	Considerações Finais	218
B	Estudo Simulado sobre Análise de Estabilidade de NCS	220
B.1	Efeito dos Atrasos Periódicos: Exemplo 1	221
B.2	Método Intervalo de Matrizes: Exemplo 2	223
B.3	Método Intervalo de Matrizes: Exemplo 3	225
B.4	Método de Gridding com Limitante em Norma: Exemplo 4	227
B.5	Considerações Finais	231
C	Validação dos Atrasos Medidos	232

D	Ensaaios em um NCS Real com <i>Buffer</i> de Atraso - Filtro Passa-Baixas	234
E	Características da Câmara de Refrigeração	236
F	Experimentos Adicionais	238
	F.1 Câmara de Refrigeração	238
	Referências Bibliográficas	240

Lista de Figuras

1.1	Arquitetura básica de um sistema de controle em rede.	2
1.2	Arquiteturas de NCS - <i>links</i> de rede.	4
1.3	Temporização dos sinais em um NCS: efeito dos atrasos.	9
3.1	Arquitetura de controle em rede local e remoto.	36
3.2	Arquitetura de controle em rede utilizada nos experimentos usando a plataforma NCS-CMUF.	38
3.3	Arquitetura do controle remoto na plataforma NCS-CMUF.	42
3.4	Ensaio 1: Atrasos medidos dia 17/10/11 (Início 18:35 horas, h=5s).	43
3.5	Ensaio 2: Atrasos medidos no dia 18/10/11 (Início 08:03 horas, h=5s).	44
3.6	Ensaio 3: Atrasos medidos dia 19/10/11 (Início 14:55 horas, h=5s).	44
3.7	Ensaio 4: Atrasos medidos dia 26/10/11 (Início 15:33 horas, h=5s).	45
3.8	Ensaio 5: Atrasos medidos dia 27/10/11 (Início 07:33 horas, h=5s).	45
3.9	Ensaio 6: Atrasos medidos dia 02/01/12 (Início 16:08 horas, h=5s).	46
3.10	Ensaio 7: Atrasos medidos dia 24/08/12 (Início 12:36 horas, h=5s).	46
3.11	Ensaio 8: Atrasos medidos dia 19/04/13 (Início 09:27 horas, h=5s).	47
3.12	Ensaio 9: Atrasos medidos dia 23/04/13 (Início 08:43 horas, h=5s).	48
3.13	Ensaio 10: Atrasos medidos dia 25/07/13 (Início 10:41 horas, h=1s).	48
3.14	Ensaio 11: Atrasos medidos dia 07/08/13 (Início 08:15 horas, h=1s).	49
3.15	Ensaio 12: Atrasos medidos dia 02/08/13 (Início 12:12 horas, h=1s).	49
3.16	Ensaio 13: Atrasos medidos dia 10/08/13 (Início 08:56 horas, h=1s).	50
3.17	Ensaio 14: Atrasos medidos dia 27/09/13 (Início 15:09 horas, h=600s).	50

3.18	Atrasos gerados com distribuições (a) poisson (b) exponencial (c) gama e (d) gaussiana.	52
3.19	Histograma atrasos gerados com distribuições (a) poisson (b) exponencial (c) gama e (d) gaussiana.	53
3.20	Arquitetura da Plataforma CMUF.	54
3.21	Arquitetura da plataforma NCS-CMUF (Nível 1: CAN, Nível 2: RS-232 Níveis 3-7: Internet).	55
3.22	Modos de operação local e remoto na plataforma NCS-CMUF. . .	56
3.23	Estrutura com <i>buffer</i> de atrasos.	59
3.24	Rede sem sincronismo.	61
3.25	Rede sincronizada.	61
3.26	Diagrama de blocos do controlador PI discreto com ação <i>anti-windup</i> . .	62
3.27	Diagrama do controlador PI com Preditor de Smith Simplificado. . .	63
3.28	Diagrama do controlador PI com Preditor de Smith Original. . . .	64
3.29	Diagrama do controlador PI discreto com Preditor de Smith (PI+PS) e ação <i>anti-windup</i>	64
4.1	Foto da planta de luminosidade (dimensões do forno 30 x 15 x 9cm). .	70
4.2	Diagrama de blocos: malha de luminosidade.	71
4.3	Resposta do modelo obtido para malha de luminosidade.	72
4.4	Foto do forno didático usado para o processo térmico (dimensões do forno 15 x 14 x 8cm).	73
4.5	Diagrama de blocos: malha de temperatura.	74
4.6	Resposta a uma entrada do tipo PRBS do modelo obtido para a malha de temperatura do forno.	75
4.7	Foto da câmara de refrigeração e módulo da plataforma NCS-CMUF. .	76
4.8	Diagrama de blocos: malha de temperatura da câmara de refrigeração.	78
4.9	Resposta do modelo obtido para malha de temperatura da câmara de refrigeração.	79

4.10	Diagrama de blocos do controlador PI com compensação explícita do sinal de controle (PI+CE).	84
4.11	Diagrama de blocos do controlador PI+PS+CE.	85
4.12	Ciclo de trabalho e efeito da restrição.	88
5.1	Fluxograma do método proposto.	95
5.2	Atrasos máximos constantes obtidos pela análise da margem de fase e simulação numérica.	97
5.3	Comparação entre os atrasos máximos (indicando as regiões mais prováveis de estabilidade): <i>Gridding</i> (linha tracejada), método proposto com atrasos aleatórios gaussiano (asteriscos), método proposto com atrasos aleatórios uniforme (pontos) e atraso constante (linha contínua).	98
5.4	Limite de estabilidade para 5.3 com controlador 5.2 e $\theta = [\tau, 3.75, 1]^T$: (a) atrasos aplicados com distribuição aproximadamente uniforme (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 75\text{ms}$ (c) resposta temporal da malha fechada.	100
5.5	Limite de estabilidade para 5.3 com controlador 5.2 e $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$: (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 1,655s$ (c) resposta temporal da malha fechada.	101
5.6	Região mais provável de estabilidade com $\theta = [\tau, K_1, K_2]^T$, sendo τ o parâmetro incerto aleatório, K_1 e K_2 ajustáveis na faixa de 1 a 20.	103
5.7	NCS real com um filtro passa-baixas (a) saída da planta (b) sinal de controle (c) atrasos (d) histograma com o número de ocorrências dos atrasos.	105
5.8	Limite mais provável de estabilidade para NCS com o filtro passa-baixas (a) atrasos aplicados com distribuição exponencial (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 22,58s$ (c) resposta temporal da malha fechada.	106

5.9	NCS real com o filtro passa-baixas e <i>buffer</i> para aumentar os atrasos da rede: (a) saída da planta (b) sinal de controle (c) atrasos (d) histograma com o número de ocorrências dos atrasos. Os atrasos foram medidos entre as mensagens do sensor e de reconhecimento do atuador ($\tau = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{Buffer} + \tau_{ca} + \tau_a$).	107
5.10	(a) Ruído medido na malha de luminosidade (b) histograma do ruído medido (c) ruído gerado para simulações em um dado ensaio (d) histograma do ruído gerado.	108
5.11	Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a malha de luminosidade (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 785\text{ms}$ (c) saída da planta em lux.	109
5.12	Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a malha de luminosidade (a) atrasos aplicados com distribuição uniforme (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 795\text{ms}$ (c) saída da planta em lux.	111
5.13	Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a malha de luminosidade (a) atrasos aplicados com distribuição exponencial (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 5,985\text{s}$ (c) saída da planta em lux.	113
5.14	(a) Ruído medido na malha de temperatura (b) histograma do ruído medido (c) ruído gerado para simulações em um dado ensaio (d) histograma do ruído gerado.	115
5.15	Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a Planta Térmica (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 101,6\text{s}$ (c) saída da planta em °C.116	
5.16	Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a Planta Térmica (a) atrasos aplicados com distribuição uniforme (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 82,35\text{s}$ (c) saída da planta em °C.118	

- 5.17 Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a Planta Térmica - picos finais (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 105,0s$ (c) saída da planta em °C. 119
- 5.18 Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a câmara de refrigeração (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 1721$ minutos (c) saída da planta em °C. 120
- 6.1 Ensaio 1, PI: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 125
- 6.2 Malha de luminosidade com controlador PI e referência senoidal: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 126
- 6.3 Malha de luminosidade com controlador PI e referência onda triangular: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 127
- 6.4 Ensaio 2, PI+CE, $\gamma=0$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 128
- 6.5 Ensaio 3, PI+CE, $\gamma=0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 129

- 6.6 Ensaio 4, PI+CE, $\gamma=0.95$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 130
- 6.7 Ensaio 5, PI+PS (τ_{sc}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 131
- 6.8 Superposição do sinais de: (a) Saída da malha (b) sinal de controle, durante uma mudança de *setpoint* nos ensaios com controlador PI e PI+PS (τ_{sc}). 132
- 6.9 Ensaio 6, PI+PS (τ_{ca}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 133
- 6.10 Ensaio 7, PI+PS (τ_{sa}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 134
- 6.11 Ensaio 8, PI+PS+CE (τ_{sc} e $\gamma = 0.9$): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 135
- 6.12 *Buffer* 1 (a) atrasos (b) histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos. 137
- 6.13 Ensaio 1, PI, *Buffer* 1: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 138

- 6.14 Ensaio 2, *Buffer* 1, PI+CE, $\gamma=0$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 139
- 6.15 Ensaio 3, *Buffer* 1, PI+CE, $\gamma=0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 140
- 6.16 Ensaio 4, *Buffer* 1, PI+CE, $\gamma=0.95$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 141
- 6.17 Ensaio 5, *Buffer* 1, PI+PS (τ_{sc}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 142
- 6.18 Ensaio 6, *Buffer* 1, PI+PS (τ_{ca}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 143
- 6.19 Ensaio 7, *Buffer* 1, PI+PS (τ_{sa}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 144

6.20	Ensaio 8, <i>Buffer</i> 1, PI+PS+CE (τ_{sc} e $\gamma=0.9$): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}	145
6.21	Atrasos no <i>Buffer</i> 2 (a) atrasos (b) histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos.	147
6.22	Ensaio 1, PI, <i>Buffer</i> 2: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . .	148
6.23	Ensaio 2, PI+CE, <i>Buffer</i> 2, $\gamma = 0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}	149
6.24	Ensaio 3, PI+PS, <i>Buffer</i> 2, τ_{sc} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . .	150
6.25	Ensaio 4, PI+PS, <i>Buffer</i> 2, τ_{sa} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . .	151
6.26	Atrasos reais medidos usados na simulação.	152
6.27	Saída da malha com uso do controlador: (a)-(f) PI simulada (linha azul); (b) PI+PS (linha contínua verde); (c) PI+PS+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua magenta); (d) PI+CE, $\gamma = 0$ (linha contínua amarela); (e) PI+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua cian) e (f) PI+CE, $\gamma = 0.95$ (linha tracejada vermelha).	153

- 6.28 Saída da malha com uso do controlador: (a)-(f) PI simulada (linha azul); (a) PI real (linha contínua vermelha); (b) PI+PS (linha contínua verde); (c) PI+PS+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua magenta); (d) PI+CE, $\gamma = 0$ (linha contínua amarela); (e) PI+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua cian) e (f) PI+CE, $\gamma = 0.95$ (linha tracejada vermelha). 154
- 6.29 Sinal de controle com uso do controlador: (a)-(f) PI simulada (linha azul); (a) PI real (linha contínua vermelha); (b) PI+PS (linha contínua verde); (c) PI+PS+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua magenta); (d) PI+CE, $\gamma = 0$ (linha contínua amarela); (e) PI+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua cian) e (f) PI+CE, $\gamma = 0.95$ (linha tracejada vermelha). 155
- 6.30 Ensaio 1, PI: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 158
- 6.31 Ensaio 2, PI+CE, $\gamma = 0$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 159
- 6.32 Ensaio 3, PI+CE, $\gamma = 0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 160
- 6.33 Ensaio 4, PI+CE, $\gamma = 0.95$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 161
- 6.34 Atrasos τ_{sa} (linha contínua em azul) e sua média móvel (linha contínua em preto) com uma janela temporal de 10 amostras. . . 162

- 6.35 Ensaio 5, PI+PS, τ_{sc} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 163
- 6.36 Ensaio 6, PI+PS, τ_{sa} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . . . 164
- 6.37 Ensaio 7, PI+PS+CE, τ_{sc} , $\gamma = 0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 165
- 6.38 Atrasos no *Buffer* (a) atrasos (b) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos. 167
- 6.39 Ensaio 1, PI, *Buffer*, referência PRBS: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 168
- 6.40 Ensaio 2, PI, *Buffer*, referência Senoidal com 0,01rad/s: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 169
- 6.41 Ensaio 3, PI, *Buffer*, referência senoidal com 0,02rad/s: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} 170

6.42	Ensaio 4, PI, <i>Buffer</i> , referência triangular: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}	171
6.43	Ruído adicionado na medida (a) ruído (b) histograma.	172
6.44	Ensaio 5, PI, <i>Buffer</i> , com Ruído: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}	173
6.45	Ensaio 6, PI, <i>Buffer</i> , com Ruído e Sintonia 2 ($\tau_d = 5s$): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}	174
6.46	Ensaio 6, PI, <i>Buffer</i> , com Ruído e Sintonia 2 ($\tau_d = 5s$):(a) Saída da malha e referência (b) atrasos (c) ruído.	175
6.47	Ensaio 1: (a) temperatura interna da câmara e setpoint igual a -15°C (b) atrasos reais medidos.	176
6.48	Atrasos medidos: escala ampliada.	177
6.49	Ensaio 1: (a) sinal de controle e temperatura ambiente (b) ciclo de trabalho (c) banco.	178
6.50	Ensaio 1, escala ampliada: sinal de controle (azul) e sua respectiva média móvel com janela temporal de 10 amostras (preto), temperatura ambiente (verde).	179
6.51	Ensaio 1: (a) corrente (b) tensão: escala ampliada com detalhe da abetura de porta.	180
6.52	Liga Desliga Convencional: (a)temperatura da câmara e temperatura ambiente (b) corrente.	180

A.1	Diagrama de blocos das plantas discreta e contínua + ZOH. . . .	194
A.2	Exemplo de geração dos atrasos com $h_2 = h/10$	195
A.3	Exemplo de geração dos atrasos (a) nulo (b) constante 0.8h. . . .	196
A.4	Exemplo de geração dos atrasos aleatórios (a) 0-1h (b) 0-2h. . . .	197
A.5	Exemplo de geração dos atrasos aleatórios 0-3h.	198
A.6	Atrasos (média = 0.0499) (a) $h_2=h/1$ (desvio padrão=0.05) (b) $h_2=h/10$ (desvio padrão=0.0292).	198
A.7	Atrasos (média = 0.0499) (a) $h_2=h/100$ (desvio padrão=0.0289) (b) $h_2=h/1000$ (desvio padrão=0.0289).	199
A.8	Planta discreta em h_2 com atraso $K_c=1.5$ (a) $h_2=h/10$ (b) $h_2=h/100$ (c) $h_2=h/1000$	200
A.9	Planta discreta em h_2 com atraso $K_c=15.2$ (a) $h_2=h/10$ (b) $h_2=h/100$ (c) $h_2=h/1000$	201
A.10	Diagrama de simulação usado para análise da resposta temporal dos modelos.	203
A.11	Resposta em malha fechada com $K_c=10$ da planta contínua e dos modelos discreto h_2 e em espaço de estados aumentado (a) atraso nulo (b)atraso constante igual 0.8h (c) atraso constante igual h. . .	204
A.12	Ampliação: Resposta em malha fechada com $K_c=10$ da planta contínua e dos modelos discreto em h_2 e em espaço de estados aumentado com atraso constante igual h.	205
A.13	Diagrama esquemático do teste de validação do modelo em espaço de estados aumentado em malha aberta e em malha fechada. . . .	206
A.14	Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de es- tados aumentado sem atraso e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2	207
A.15	Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de es- tados aumentado com atraso constante 0.8h e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2	208

A.16 Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de estados aumentado com atraso constante 1h e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2	209
A.17 Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de estados aumentado com atraso variável 0-1h e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2	210
A.18 Atraso variável 0-1h.	211
A.19 Diagramas de Bode: modelo em espaço de estados aumentado (verde) e discreto superamostrado $h_2=h/10$ (azul) e atraso nulo. .	212
A.20 Diagramas de Bode: modelo em espaço de estados aumentado (verde) e discreto superamostrado $h_2 = h/10$ (azul) e atraso constante 0.8h.	214
A.21 Modelo discreto em h_2 e ssa com atraso variante $K_c=10$ (a) Cayley Hamilton (b) Jordan (c) Expm.	216
A.22 Validação dos modelos discreto superamostrado e ssa.	218
A.23 Atrasos na rede (a) atraso e (b) histograma.	218
B.1 Região de Estabilidade [Cloosterman et al., 2006].	221
B.2 Resposta do estado x_1 com atraso (a) fixo 0.2h (b) fixo 0.6h. . .	222
B.3 Resposta do estado x_1 com atraso periódico 0.2-0.6h.	223
B.4 Retorno do programa exemplo 2 $K_2 = 11.8$ e atraso máximo (a) 0.2h (b) 0.4h.	224
B.5 Exemplo 2: Resposta do modelo sujeito a atrasos variantes entre 0 e 0.065 s (0.65h).	226
B.6 Exemplo 2: Atrasos variantes entre 0 e 0.065 s (0.65h).	226
B.7 Exemplo 2: Intervalo de matrizes efeito da redução do politopo. .	227
B.8 Exemplo 3 - método <i>gridding</i> : atraso máximo (s) em função do ganho de velocidade K_2	230
C.1 Validação dos atrasos medidos com timestamp e Pcanview.	232
C.2 Medição de uma amostra do atraso com osciloscópio.	233

D.1	Ensaio 1: atrasos medidos em NCS real com <i>buffer</i> de atrasos. . .	235
D.2	Ensaio 1: saída da planta e sinal de controle medidos em NCS real com <i>buffer</i> de atrasos.	235
E.1	Exemplo da capacidade de refrigeração mantida sob redução de tensão.	237
F.1	Ensaio 2: (a) temperatura interna da câmara e <i>setpoint</i> igual a -15°C (b) atrasos reais medidos.	238
F.2	Ensaio 2: (a) sinal de controle e temperatura ambiente (b) ciclo de trabalho (c) banco.	239

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros Estatísticos de Atrasos Medidos em um NCS real (S: sequência de ensaios, N: número de amostras, τ_{med} : atraso médio, τ_{min} : atraso mínimo, τ_{max} : atraso máximo, σ : desvio padrão, F: faixa [0-99,7%], D: desvio máximo).	47
3.2	Parâmetros Estatísticos de Atrasos Medidos em NCSs reais (S: sequência de ensaios, h: período de amostragem, N: número de amostras, τ_{med} : atraso médio, τ_{min} : atraso mínimo, τ_{max} : atraso máximo, σ : desvio padrão, F: faixa [0-99,7%], D: desvio máximo).	51
4.1	Parâmetros dos Controladores para Malha de Luminosidade	85
4.2	Parâmetros dos Controladores para Malha de Temperatura	86
4.3	Parâmetros do Controlador PI: Malha de Temperatura da Câmara	86
5.1	Resultados da Simulação Numérica com $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$ e Distribuição Uniforme	102
5.2	Resultados da Simulação Numérica com $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$ e Distribuição Gaussiana	103
5.3	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Exponencial para o Filtro Passa-Baixa	106
5.4	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Malha de Luminosidade e Controlador PI	110
5.5	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Uniforme para a Malha de Luminosidade e Controlador PI	112

5.6	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Exponencial para a Malha de Luminosidade e Controlador PI	114
5.7	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Planta Térmica e Controlador PI	117
5.8	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Uniforme para a Planta Térmica e Controlador PI	118
5.9	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Planta Térmica e Controlador PI - Picos Finais	119
5.10	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Uniforme para a Planta Térmica e Controlador PI - Picos Finais	120
5.11	Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Câmara de Refrigeração e e Controlador PI	121
6.1	Comparação dos Controladores na Malha de Luminosidade	136
6.2	Comparação dos Controladores na Malha de Luminosidade com <i>Buffer</i> 1	146
6.3	Comparação dos Controladores na Malha de Luminosidade com <i>Buffer</i> 2	152
6.4	Simulação dos Controladores na Malha de Luminosidade	156
6.5	Comparação dos Controladores na Malha de Temperatura	166
A.1	Plantas e Controladores Empregados nos Ensaio Realizados	192
A.2	Erros do Modelo Discreto Superamostrado sob Variação de h_2	199
A.3	Erros Modelo Espaço de Estados	211
A.4	Resposta em frequência dos modelos analisados com $K_c=10$ e atraso nulo.	213
A.5	Resposta em frequência modelos analisados com $K_c = 10$ e atraso constante 0.8h.	213
A.6	Diferença entre Elemento $a_{1,1}$	215
A.7	Erros Modelo Espaço de Estados Aproximações $K_c=10$ atraso variável	217

B.1	Exemplo 3: Método de <i>Gridding</i>	231
E.1	Especificações técnicas da câmara de refrigeração.	236

Lista de Símbolos e Abreviaturas

α_i	Coefficientes da combinação convexa
α_1	Valor da resolução no método proposto
α'	Variável auxiliar frequencial
β	Parâmetro do PI discreto
β_1	Constante de tempo do filtro no método proposto
β_p	Politopo
γ	Constante de tempo do filtro do controlador CE
γ_i^k	Variável auxiliar modelo aumentado
δ_1	Incremento/decremento no método proposto
δ_i	Erro da aproximação no método de gridding
δ'	Parâmetro que especifica a região de incerteza
Δ	Incerteza
Δ'	Incerteza modelo frequencial
Δy_T	Variação de saída da planta - malha de temperatura
Δy_L	Variação de saída da planta - malha de luminosidade
Δy_R	Variação de saída da planta - câmara de refrigeração
Δu_T	Variação do sinal de controle - malha de temperatura
Δu_L	Variação do sinal de controle - malha de luminosidade
Δu_R	Variação do sinal de controle - câmara de refrigeração
ϵ	Inteiro positivo
η	Vetor de estados do controlador
θ	Vetor de parâmetros incertos
θ_1	Parâmetro incerto aleatório
θ_{1f}	Parâmetro incerto aleatório filtrado
θ_{1min}	Limite inferior do parâmetro incerto aleatório
θ_{1max}	Limite superior do parâmetro incerto aleatório
$\bar{\theta}_1$	Limite máximo do parâmetro incerto aleatório
$\theta_{2...m}$	Parâmetro incerto com variação suave
$\theta_m(k)$	Atraso do preditor no instante k
θ_p	Atraso da planta
ξ_i	Vetor de estados aumentado
σ	Desvio Padrão

$\tau(t)$	Atraso variante no tempo
τ_c	Tempo de execução do algoritmo de controle
τ_p	Atraso da planta
τ_{sc}	Atraso entre sensor e controlador
τ_{sa}	Atraso entre sensor e atuador
τ_{ca}	Atraso entre controlador e atuador
τ_s	Tempo de aquisição dos dados dos sensores
τ_a	Tempo de atuação
τ_k	Atraso total no loop no instante k
τ_{min}	Atraso mínimo
τ_{max}	Atraso máximo
τ_{med}	Atraso médio
τ_{Buffer}	Atraso no Buffer
τ'	Atraso modelo frequencial
τ_d	Constante de tempo em malha fechada desejada
τ_{mf}	Constante de tempo em malha fechada
τ_{ma}	Constante de tempo em malha aberta
τ_1	Constante de tempo em malha aberta 1
τ_2	Constante de tempo em malha aberta 2
τ_f	Constante de tempo do filtro passa baixas
$\tilde{\tau}_i$	Atrasos escolhidos para o grid
$\bar{\tau}_{sc}$	Atraso entre sensor e controlador filtrado
$\bar{\tau}_{ca}$	Atraso entre controlador e atuador filtrado
$\bar{\tau}_{sa}$	Atraso entre sensor e atuador filtrado
$\bar{\tau}_{rede}$	Atraso médio da rede
Φ_c, Γ_c, C_c	Matrizes de realização do controlador
Φ_p, Γ_p, C_p	Matrizes de realização da planta
$Co\{\}$	Conjunto convexo
ω_{cp}	Frequência de cruzamento de fase
a_L	Constante de calibração da luminosidade
a_R	Constante de calibração da temperatura da câmara
a_T	Constante de calibração da temperatura do forno
a_1, a_2	Coefficientes do modelo ARX
b_1, b_2	Coefficientes do modelo ARX
b_L	Offset de calibração da luminosidade

b_R	Ofsset de calibração da temperatura da câmara
Acc_{ud}	Déficit do sinal de controle acumulado
$\tilde{A}$	Matriz do sistema aumentado
h	Período de amostragem
h_2	Período de amostragem da superamostra
i_{max}	Número máximo de iterações
K	Ganho de realimentação de estados
K_c	Ganho proporcional do PI em s
K_s	Ganho do preditor
K'	Ganho proporcional do PI em z
K_1	Ganho de posição
K_2	Ganho de velocidade
i	i-ésima iteração
l	l-ésima amostra
n	Número de amostras
n_{ic}	Número de intervalos calculados
n_{ia}	Número de intervalos aplicados
N_g	Número de pontos de grid
P_m	Margem de fase
u	Sinal de controle
u_T	Sinal de controle da malha de temperatura
u_L	Sinal de controle da malha de luminosidade
u_R	Sinal de controle da câmara de refrigeração
u_0	Offset do sinal de controle
u_a	Sinal de controle atrasado
ud	Déficit do sinal de controle
$\bar{u}$	Sinal de controle estimado
u^*	Entrada constante por partes
$\mathbf{x}$	Vetor de estados
$\mathbf{y}$	Saída da planta
y_0	Offset da saída da planta
y_T	Saída da planta da malha de temperatura
y_L	Saída da planta da malha de luminosidade
y_R	Saída da planta da câmara de refrigeração
T_i	Tempo integral

T_d	Tempo derivativo
L_i	Restrição LMI
v_k	Máximo atraso sensor
A/D	Conversor Digital/Analógico
CAN	Controler Area Network
CAN-PIC	Estação Microcontrolada
CE	Compensação Explícita do Sinal de Controle
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CMUF	Centro de Monitoramento de Usos Finais
CMUF-R	CMUF- Refrigeração
CPEI	Centro de Pesquisa em Energia Inteligente
CPU	Central Processing Unit
D/A	Conversor Analógico/Digital
FIP	Factory Instrumentation Protocol
GCPI	Grupo de Controle de Processos Industriais
HBH	Hemocentro de Belo Horizonte
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICQ	Integral quadratic constraints
ICMP	Internet Control Message Protocol
ID	Identificador da mensagem
IP	Internet Protocol
LAN	Local area network
LCPI	Laboratório de Controle de Processos Industriais
LDR	Light Dependent Resistor
LMI	Linear Matrix Inequalities
LQG	Linear Quadrático Gaussiano
MA	Malha Aberta
MABD	Maximum Allowable Delay Bound
MAN	Metropolitan area network
MARS	Módulo de Amplificação e Retificação de Sinais
MATI	Maximum Allowable Transfer Interval
MC	Monte Carlo
MF	Malha Fechada
MIL-STD	Military Standard (protocolo de comunicação)
MPNC	Model Predictive Networked Controller

MV	Variável Manipulada
NCS	Networked Control Systems
NCS-CMUF	Nome da Plataforma Utilizada
NPC	Networked Predictive Control
NTP	Network Time Protocol
OLE	Object Linking and Embedding
OPC-UA	OLE for Process Control - Unified Architecture
P	Proporcional
PI	Proporcional e Integral
PI+PS	PI com Preditor de Smith
PI+CE	PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle
PI+PS+CE	PI+PS e Compensação Explícita do Sinal de Controle
PD	Proporcional e Derivativo
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence
PS	Preditor de Smith
PWM	Pulse Width Modulation
RAN	Regional Area Network
RC	Resistor-Capacitor
RAM	Random Access Memory
RTT	Round Trip Time
ssa	Denominação para modelo em espaço de estados aumentado
SP	Setpoint
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
VOIP	Voice over Internet Protocol
WAN	Wide area network
WEB	Rede de abrangência mundial
WS	Servidor Web
ZOH	Zero Order Hold

Capítulo 1

Introdução

Nesta Tese é dada ênfase ao projeto de controle e a análise da região mais provável de estabilidade de Sistemas de Controle em Rede (mais conhecidos pelo acrônimo NCSs) reais sujeitos a atrasos variantes no tempo. O paradigma dominante atualmente na área de NCSs se baseia na análise do limite de atraso máximo, por meio de abordagens determinísticas. Propõe-se neste trabalho uma abordagem de análise probabilística como alternativa à análise convencional. Este estudo enfatiza a importância de se adotar métodos probabilísticos para uma análise e projeto mais realísticos de NCSs especialmente em aplicações práticas [Batista e Jota, 2013], [Batista e Jota, 2014]. Constata-se que um significativo aumento nas margens de estabilidade pode ser obtido se as estatísticas dos atrasos forem consideradas com um relativo baixo nível de risco (com pequena probabilidade de ocorrência), obviamente nos casos em que este for admissível.

Neste capítulo são apresentados a introdução ao problema de sistema de controle em rede e aos efeitos dos atrasos variantes no comportamento da malha fechada; a motivação para o desenvolvimento deste trabalho; os objetivos e as contribuições da Tese. Ao final do capítulo é apresentada uma breve revisão sobre as ferramentas adotadas na metodologia proposta, destacando o Método de Monte Carlo e suas aplicações em análise de sistemas estocásticos. O referido método estatístico é empregado para a análise da região mais provável de estabilidade de NCSs, sujeitos a atrasos variantes. Apresenta-se também uma sucinta

descrição de dois métodos de busca e convergência utilizados, denominados *Quick-sort* e Método do Gradiente.

1.1 O Problema de Sistemas de Controle em Rede

Nos sistemas de controle em rede (NCSs), os elementos de campo (sensor e atuador) são interligados ao controlador por meio de uma rede de comunicação de dados, como ilustrado na Figura 1.1.

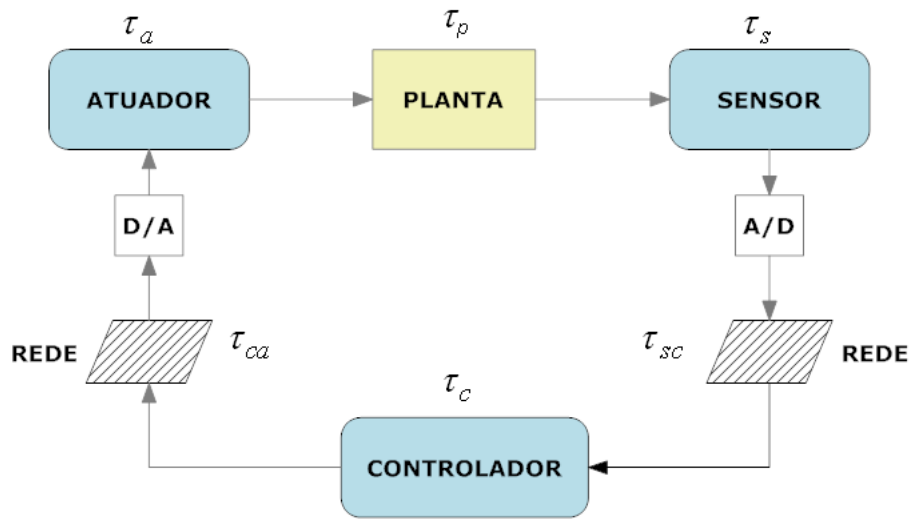


Figura 1.1: Arquitetura básica de um sistema de controle em rede.

Um NCS agrega as vantagens dos sistemas distribuídos tais como redução dos custos com cabeamento e manutenção, uma vez que não requer cabeamento dedicado e também permite transmissão dos dados via rede *wireless*. Embora os NCSs apresentem melhores características em termos de modularidade e escalabilidade se comparado a arquitetura centralizada, trazem consigo também os problemas da introdução de atrasos na transferência das mensagens entre o controlador e os elementos de campo (sensor e atuador) e consequentemente variações e incertezas na representação da dinâmica da malha. Quando uma malha de controle é fechada sob uma rede de comunicação de dados, são introduzidos atrasos e variações de atrasos na transmissão de mensagens, na amostragem, na atuação ou na execução das ações de controle das malhas [Martins, 2009],

[Halevi e Ray, 1988a], [Nilson, 1998], além da dificuldade em se estabelecer uma referência exata de tempo devido aos problemas de sincronização entre os relógios de cada unidade da rede. A implementação de um NCS requer projeto adequado das estratégias de controle e respectivas sintonias de forma a garantir a estabilidade e o desempenho do sistema sob qualquer condição operacional. Existem classes de malhas de controle que são mais sensíveis aos atrasos e a variações do mesmo.

Um NCS pode apresentar atrasos adicionais, além dos típicos de um sistema de controle digital, na planta (τ_p), na aquisição de dados do sensor (τ_s), na execução do algoritmo de controle (τ_c), na atuação (τ_a), nas transmissões de mensagens entre o sensor e o controlador (τ_{sc}) e entre o controlador e o atuador (τ_{ca}) [Batista e Jota, 2013]. A malha de controle fechada através de uma rede de comunicação de dados também tem de lidar com a presença de variações nesses atrasos, irregularidades na amostragem, ruídos no canal de comunicação, dados corrompidos, perdas de pacotes, perdas de conexão e capacidade limitada da rede. Se os relógios das unidades tiverem sincronizados, por meio de estampas de tempo é possível que o atraso τ_{sc} seja conhecido no instante de execução do algoritmo de controle, podendo o mesmo ser compensado pelo controlador. Já o atraso τ_{ca} ocorre depois da execução do algoritmo de controle e não é conhecido no instante que o controlador gera o sinal de controle. Portanto, estratégias mais elaboradas para predição e compensação dos atrasos em NCSs são requeridas dependendo da forma com que os atrasos ocorrem e das características do processo controlado [Martins, 2009], [Zhang et al., 2001], [Zhang et al., 2011], [Yang e Wang, 2005] e [Silva e Lima, 2010].

Na literatura, são apresentadas diferentes arquiteturas de sistemas de controle em rede que têm sido estudadas. Nestas arquiteturas, o *link* de comunicação pode estar localizado entre o sensor e a entrada do controlador (também denominado de *up-link*, ver [Goodwin et al., 2008] e referências internas) ou entre a saída do controlador e o atuador (*down-link*). A Figura 1.2 apresenta as arquiteturas de NCSs, onde o *link* de rede pode ser estabelecido entre sensor e controlador (a),

entre controlador e atuador (b). Ressalta-se que, tanto na arquitetura (a) quanto na arquitetura (b) o controlador se encontra fisicamente junto à planta e não remoto. A arquitetura (a) se caracteriza como um problema de medição remota e a arquitetura (b) atuação remota. Outra possibilidade é ocorrer simultaneamente a presença dos dois *links* descritos (entre sensor-controlador e controlador-atuador), conforme a arquitetura da Figura 1.1, que é tipicamente um problema de NCS no qual o controlador se encontra de fato remoto.

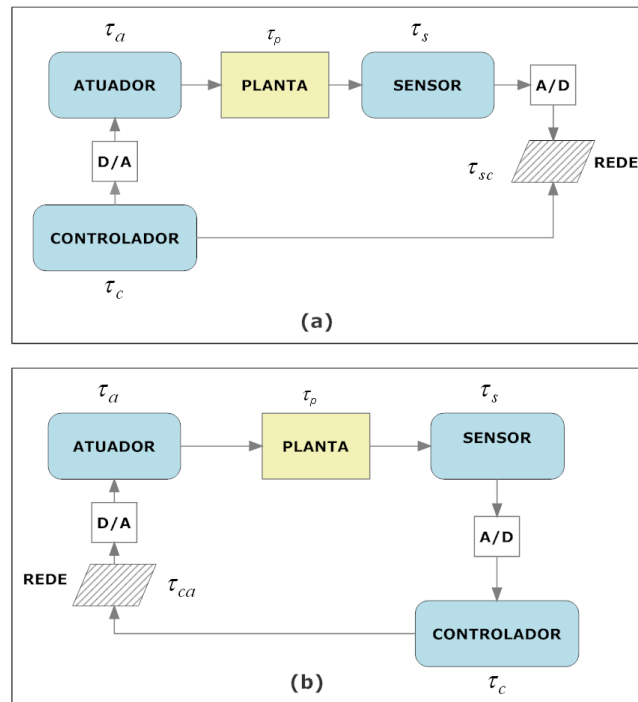


Figura 1.2: Arquiteturas de NCS - *links* de rede.

No projeto de um NCS existem problemas de grande complexidade que, em geral, vêm sendo tratados de forma isolada. A integração destes tem impacto na modelagem, análise e síntese de NCS. Algumas abordagens de modelagem de NCSs bem como as implicações das simplificações adotadas serão discutidas no Capítulo 2. Dentre os problemas típicos associados ao projeto e análise de NCS, destacam-se [Martins, 2009], [Zhang e Yu, 2007], [Cloosterman, 2008], [Lai et al., 2008]:

- atrasos variáveis: Os atrasos em NCS são fortemente dependentes da condição de tráfego da rede, o que os torna variáveis;

- perdas de pacote: O fenômeno de perdas de pacote é caracterizado pela perda de uma mensagem na rede. As perdas de pacotes podem ocorrer devido à limitação da largura de banda na rede de comunicação, degradação do sinal no meio físico, rejeição de pacotes corrompidos, falha na rede ou no roteamento, etc;
- rejeição de mensagens: O fenômeno da rejeição de mensagens é caracterizado pela recepção, por parte do controlador, de duas mensagens relativas a valores de medição dentro de um mesmo intervalo de amostragem;
- amostragem vazia: O fenômeno da amostragem vazia é caracterizado pela ausência da grandeza medida dentro de um intervalo de amostragem;
- amostragem irregular: A presença dos atrasos em um NCS faz com que as informações de entrada e saída do controlador percam a regularidade do instante de amostragem.

Genericamente, em um sistema de controle, a comunicação entre os processos em cada unidade da rede pode ser inicializada por meio de interrupções ou por passagem de bastão. Duas fontes de interrupções podem ser implementadas, interrupções disparadas por tempo (*Time-Driven*) ou interrupções disparadas por eventos (*Event-Driven*). As interrupções por tempo em aplicações de controle, geralmente, são baseadas em atividades periódicas e contínuas, dada as próprias características do sistema de controle digital com amostragem periódica. Nas interrupções por eventos, geralmente, as atividades ocorrem assincronamente [Chen e Wang, 2002]. Na presente Tese foi adotada uma configuração em que os sensores são autônomos e disparados por tempo, isto é, a cada interrupção de tempo, o sensor gera uma mensagem com o sinal de realimentação e o envia para o controlador remoto. Este por sua vez, ao receber a mensagem com o sinal de realimentação calcula o sinal de controle e o envia para o atuador, ou seja, os controladores remotos são disparados por evento (chegada da mensagem). Na configuração escolhida, o atuador também é disparado por evento, isto é, este responde ao evento de chegada da mensagem com o sinal de controle. Embora

se tenha optado pelo controlador e atuador sendo disparados por eventos, na plataforma utilizada no presente trabalho, todas as estações (sensor, controlador ou atuador) podem responder a eventos ou interrupções de tempo se desejado.

Um projeto de um NCS envolve áreas de conhecimentos muito diferentes, indo desde sistemas de controle, redes de comunicação a sistemas de tempo real, uma vez que, as redes de comunicação devem oferecer um serviço para transmissão em tempo real. Pesquisadores destas três áreas têm visões distintas sobre NCSs, entretanto, o projeto do mesmo deve ser integrado [Santos, 2004]. No que se refere às redes de comunicação para NCSs, importantes pesquisas têm sido desenvolvidas visando ao desenvolvimento de protocolos específicos para NCSs que garantam confiabilidade e segurança [Wang e Liu, 2008]. A aquisição e o processamento dos sinais dos sensores de forma eficiente é outra preocupação em NCSs, sendo esta uma área de pesquisa complementar, mas de grande relevância [Wang e Liu, 2008].

Questões relacionadas com NCSs têm sido relatadas na literatura seguindo basicamente duas linhas de trabalho [Wu et al., 2005]. A primeira é baseada no projeto da rede, objetivando otimizar o desempenho da rede e melhorar a qualidade do serviço oferecido; o projeto de controle, em geral, é feito sem qualquer consideração explícita dos efeitos dos atrasos e perdas de dados. A segunda linha de trabalho baseia-se no controle sem a intervenção direta na rede (*over network*), considerando-se o protocolo de rede e as condições de tráfego dadas; o projeto das estratégias de controle considera explicitamente os efeitos dos atrasos, irregularidades na amostragem e perdas de dados. Nesta Tese, a última abordagem é discutida em mais detalhe, com ênfase nos efeitos dos atrasos variantes.

As características dos atrasos em NCSs podem variar de acordo com o tipo, a arquitetura e a extensão geográfica da rede (podendo estas ser, por exemplo, do tipo LAN - *Local Area Network*, RAN - *Regional Area Network*, MAN - *Metropolitan Area Network*, WAN - *Wide Area Network* dentre outras), os protocolos adotados, os meios físicos de comunicação, as condições de tráfego e o *hardware* escolhido. A rede de comunicação é a espinha dorsal dos NCSs, portanto, deve

oferecer confiabilidade, segurança, facilidade de uso e disponibilidade para a aplicação desejada [Gupta e Chow, 2010].

Dependendo do tipo de rede, os atrasos podem ser constantes ou variar de forma limitada ou aleatória [Yang, 2006]. Nas redes com serviço cíclico, tais como, IEEE 802.4, SAE *token bus*, PROFIBUS, IEEE 802.5, SAE *token ring*, MILSTD-1553B, FIP [Tipsuwan e Chow, 2003] e a *Foundation Fieldbus* [Peserchini e Jota, 2013], apesar de teoricamente os atrasos apresentarem um comportamento determinístico, na prática, estão sujeitos a pequenas variações de atrasos, por exemplo, devido a erros de sincronização entre os relógios. Por outro lado, as redes de acesso aleatórios, tais como, CAN (*Controller Area Network*) e Ethernet, especialmente na Internet [Karakas, 2003] ou ainda a Ethernet Industrial [Wang et al., 2011], estão sujeitas a atrasos incertos. O presente trabalho aborda o problema da NCSs em redes com atrasos aleatórios, enfatizando especialmente a Internet. Atrasos determinísticos podem ser vistos como casos particulares, e são, em geral, mais fáceis de lidar do que os atrasos aleatórios.

Atualmente, esforços multidisciplinares estão sendo direcionados para a produção de estruturas de rede, componentes e ferramentas de análise e de projeto, que são capazes de lidar com o controle em tempo real através de redes de comunicação [Gupta e Chow, 2010], em especial, através da rede pública mundial de computadores, a Internet. Devido aos recentes desenvolvimentos tecnológicos, à facilidade de acesso e ao baixo custo, a Internet tornou-se promissora para aplicações de NCSs. Vários trabalhos utilizam a Internet para aplicações de NCSs [Batista e Jota, 2014], [Martins e Jota, 2009], [Tipsuwan e Chow, 2004], [Drew et al., 2005], [Park e Lee, 2001]. Estruturas mistas, também são adotadas em NCSs com a utilização de mais do que um tipo de rede na malha de controle [Martins e Jota, 2009], [Lai et al., 2008]; por exemplo, em [Martins e Jota, 2009] e no presente trabalho a rede CAN, a rede serial RS-232 e a Internet foram utilizadas; em [Lai et al., 2008] utilizou-se a rede CAN e a Ethernet. Outra topologia promissora para aplicações de NCSs é a arquitetura de rede *wireless mesh* [Chen et al., 2011], que pode ser viabilizada, por exemplo, por meio de

um padrão de serviços e servidores como o OPC-UA (*OLE for Process Control Unified Architecture, OLE: Object Linking and Embedding*) [OPC, 2013], no qual vários tipos de sistemas e dispositivos podem se comunicar pela troca de mensagens entre clientes e servidores sobre inúmeros tipos de rede [Leitão, 2010], [Trnka et al., 2012].

1.2 Efeito dos Atrasos na Malha Fechada

Como já dito, em um NCS real sob uma rede compartilhada, os atrasos são variantes no tempo e aparecem nos sinais de controle e de realimentação, isto é, na entrada e saída da malha. Como representado no modelo (1.1), o atraso total, é uma função dependente do tempo e a avaliação de como a variação dinâmica do mesmo interfere no sistema em malha fechada é um fator crucial.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{1.1}$$

Em (1.1), $x(t)$, $u(t)$ e $y(t)$ correspondem, respectivamente, ao vetor de estados, à entrada e à saída da planta, $\tau(t)$ é o tempo decorrido entre o instante de medição do sinal de realimentação e de aplicação do sinal de controle na planta e A, B e C representam as matrizes de estados, de entrada e saída do sistema respectivamente, com dimensões apropriadas. É sabido que os atrasos causam uma redução na margem de fase e, de acordo com o seu comportamento, eles podem levar à degradação do desempenho ou até mesmo à instabilidade do sistema [Zhang et al., 2001], [Lian et al., 2002], [Tipsuwan e Chow, 2003]. Dependendo do tipo de rede e das condições de tráfego, os atrasos em NCSs podem apresentar grandes variações e diferentes características estatísticas, com diferentes distribuições, por exemplo, apresentar média e variância dependente do tempo [Batista e Jota, 2014], [Peng et al., 2009], [Tipsuwan e Chow, 2004], [Park e Lee, 2001], [Karakas, 2003]. A ocorrência de atrasos variáveis aumenta a complexidade da análise e síntese dos controladores, bem como a dificuldade de

simular as condições reais por meio de algoritmos computacionais.

Vale destacar que, os atrasos variantes em NCSs provocam irregularidades nos períodos de amostragem, como mostrado na Figura 1.3. Portanto, o tempo em que cada sinal de controle calculado (a cada instante de amostragem) é efetivamente aplicado na planta é também variante (podendo ser maior ou menor que um período de amostragem regular). Como ilustrado na Figura 1.3 o sinal de controle u_{k-1} foi efetivamente aplicado por um instante de tempo muito menor que o período de amostragem regular.

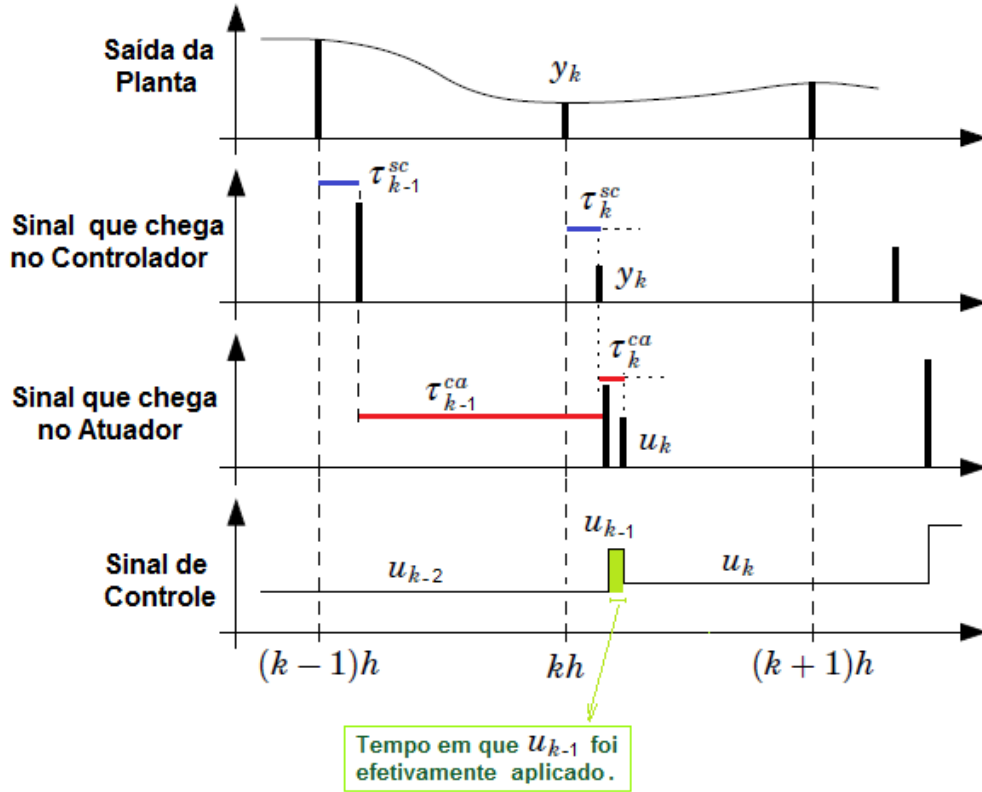


Figura 1.3: Temporização dos sinais em um NCS: efeito dos atrasos.

A ocorrência de atrasos elevados (superiores a um período de amostragem regular) em NCSs provoca enfileiramento de mensagens. Uma fila de mensagens que chega ao atuador (com os sinais de controle calculados) pode ser processada e aplicada na planta em um pequeno intervalo de tempo (por exemplo, em poucos milissegundos na plataforma utilizada nesse trabalho, denominada de NCS-CMUF “*Networked Control System - Centro de Monitoramento de Usos Finais*”

[Jota et al., 2009] e que será detalhada no Capítulo 3). Isto implica que alguns sinais de controle calculados serão efetivamente aplicados por um intervalo infinitesimal de tempo. Este fato implica ainda que um atraso elevado pode ser ‘recuperado’ rapidamente (em um intervalo de tempo muito pequeno, da ordem de milissegundos) se este é seguido de pequenos atrasos, isto é, ocorra taxas de variações negativas. É importante ressaltar que, esta forma como os atrasos ocorrem e como as mensagens são processadas em NCSs, provocam efeitos diferentes na malha fechada se comparado com a ocorrência de um atraso elevado em um sistema de controle digital com atraso convencional, em que só é possível ‘recuperar’ o atraso de 1 amostragem a cada período de amostragem. Portanto, os efeitos dos atrasos variantes em NCSs requerem análise e tratamento diferenciados.

1.3 Motivação

Motivados pelo desenvolvimento de novas tecnologias, o Grupo de Controle de Processos Industriais (GCPI) da UFMG tem buscado soluções (usando a plataforma CMUF [Jota et al., 2002]) para o problema de controle em ambiente distribuído para aplicações no novo paradigma do sistema elétrico, com utilização de redes inteligentes e geração e consumo distribuídos (*Smart Grids* e *Micro-Grids*). Sendo o desenvolvimento destas novas tecnologias a grande motivação para se trabalhar com um estudo experimental aplicado à sistemas de controle em rede pelo desafio e aplicabilidade que se apresentam.

Embora muitos trabalhos tenham sido publicados na área de NCSs, várias limitações são encontradas para projeto do sistema de controle em rede real. Assim, estudos experimentais são necessários para investigar formas de representações e técnicas de análise adequadas para processos reais que lidam com atrasos variáveis, bem como para prover estratégias de controles adequadas para as aplicações práticas.

A presença de *links* de comunicação em malhas de controle de processos aumenta significativamente a complexidade no projeto de controle, uma vez que,

introduzem atrasos e variações de atrasos, irregularidades na amostragem, perdas e desordenamentos de pacotes. Estes fenômenos agregam grande dificuldade na representação, análise e síntese dos controladores, sendo portanto, um problema desafiador que motiva os estudos na área.

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo:

- analisar as ferramentas para modelagem, projeto e análise de estabilidade em sistemas de controle em rede disponíveis na literatura com foco nas aplicações práticas, sendo estas apresentadas e agrupadas por metodologia ou ferramenta empregada, grau de conservadorismo, viabilidade de aplicação prática, etc;
- instalar um sistema distribuído para monitoramento e controle em um sistema real, que possibilite a implementação de estratégias de controle em rede, utilizando uma plataforma disponibilizada dentro do projeto CMUF-R (CMUF-Refrigeração) denominada NCS-CMUF;
- analisar os efeitos das estatísticas dos atrasos variantes na região de estabilidade de NCSs;
- apresentar resultados de um estudo das regiões mais prováveis de estabilidade em NCSs, para projeto da estrutura de controle com menor grau de conservadorismo;
- simular e validar em uma plataforma real exemplos de sistemas de controle em rede.

1.5 Contribuição

A contribuição principal deste trabalho está no fornecimento de uma nova abordagem, para aplicações nos casos práticos, para análise das regiões mais

prováveis de estabilidade em sistemas de controle em rede reais. Na metodologia proposta busca-se examinar sistematicamente os padrões de comportamentos possíveis do sistema em malha fechada sujeito a incertezas, por meio da avaliação da resposta temporal. A metodologia proposta é baseada no método de Monte Carlo e fornece os limites de atrasos máximos mais prováveis que resultem em estabilidade da malha. Com a utilização do método proposto evidencia-se a importância da análise do efeito da distribuição de probabilidade dos atrasos para o projeto dos controladores em NCSs. Ressalta-se que, geralmente, nos casos reportados na literatura a estabilidade tem sido garantida para atrasos limitados a um ou dois períodos de amostragem [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2009], [Cloosterman et al., 2006], [Dritsas e Tzes, 2009], [Zhang et al., 2001]. Entretanto, em um NCS real, em rede compartilhada com condições de tráfego e eventos incertos, não é possível se ter a garantia de que atrasos fiquem limitados aos máximos estabelecidos pelos métodos de análise. Assim sendo, na prática, sempre existirá a possibilidade de o sistema real eventualmente instabilizar-se. Além disso, dependendo das características da planta e do controlador projetado, a presença de atrasos entre 0 e 1 período de amostragem pode não afetar significativamente a malha fechada do sistema real, como será mostrado no Capítulo 6.

Neste trabalho, propõe-se lançar luz sobre esta nova abordagem e focar na análise do efeito das variações dos atrasos. O método proposto tem grande flexibilidade quanto à estratégia de controle adotada. Ressalta-se que, nos casos práticos, os atrasos na rede podem ultrapassar vários períodos de amostragens regulares, o que dependendo das características da planta real pode exigir estratégias de controle mais complexas e que forneçam algum tipo de compensação e adaptação. Portanto, é importante que a ferramenta de análise tenha flexibilidade quanto à estrutura do controlador a ser adotado. Outra questão importante é a viabilidade (em termos de tempo de execução e tratamento numérico) da aplicação da ferramenta à medida que se aumenta o número de incertezas (presentes nos NCSs reais), neste contexto, o método proposto mostra-se aplicável.

Destaca-se que metodologias encontradas na literatura apresentam limitações de implementação à medida que se aumenta o número de incertezas.

No estudo bibliográfico realizado constatou-se que existe uma lacuna entre os desenvolvimentos teóricos e as aplicações práticas de NCSs. Deve-se valorizar esforços que reduzam esta lacuna e que contribuam para o avanço de novas técnicas e tecnologias. Daí a necessidade de se preocupar com questões práticas. Neste sentido é importante investir em metodologias que possam ser utilizadas para investigação dos problemas que surgem quando o NCS é implementado, de forma a avaliar questões muitas vezes não consideradas no desenvolvimento teórico. Com este intuito a metodologia proposta vem contribuir para a redução desta lacuna e possibilitar a análise de um NCS real de forma a fornecer um índice de fronteira para o limiar de estabilidade em uma aplicação prática. A metodologia fornece condições para análise dos efeitos das variações dos atrasos e índices (que podem ser utilizados como parâmetros na síntese dos controladores) como, por exemplo, os limites máximos de atrasos variantes suportado pelo NCS sujeito a determinadas distribuições de atrasos. Destaca-se que praticamente não existem na literatura resultados de avaliação experimental que forneçam regiões de estabilidade menos conservadoras de NCSs.

A implementação de estudos de casos reais com sistema de monitoramento contínuo por longo período e com o sistema de controle fechado com vários *links* de rede e, sobretudo, sob a rede mundial de computadores, permite a quantificação e a validação dos efeitos reais dos atrasos em NCSs.

1.6 O Método de Monte Carlo Aplicado à Análise de Sistemas Estocásticos

A metodologia proposta no presente trabalho para a análise das regiões mais prováveis de estabilidade de NCSs reais [Batista e Jota, 2014] é baseada no conhecido Método de Monte Carlo [Metropolis e Ulam, 1949] e na análise da resposta temporal, acoplada ao algoritmo *Quicksort* e ao Método do Gradiente para busca

e convergência. O detalhamento da metodologia proposta é apresentado no Capítulo 5 e também em [Batista e Jota, 2014].

O Método de Monte Carlo é útil para a obtenção de soluções numéricas e, no caso da aplicação em NCSs, permite simular eventos aleatórios que ocorrem em NCSs com a vantagem de permitir grande flexibilidade quanto à estrutura do controlador. O método de Monte Carlo consiste em gerar um número de observações com uma dada distribuição de probabilidade e utilizar cada amostra gerada para avaliar seu modelo ou função de interesse [Metropolis e Ulam, 1949].

Desde a década de 90 trabalhos que utilizam o método de Monte Carlo em aplicações na área de controle (vide por exemplo [Tempo e Ishii, 2007] e referências internas) vêm sendo propostos, embora o método de Monte Carlo tenha sido publicado em 1949. O referido método tem sido aplicado principalmente por pesquisadores da área de engenharia química (talvez pelas não-linearidades presentes nos processos que limitam o uso de técnicas convencionais), sendo o mesmo utilizado para estimar a probabilidade do sistema em malha fechada instabilizar-se ou violar requisitos de desempenho. Em [Paladino e Ratto, 2000], estudou-se um processo de reator agitado com controle PI, este sistema tem uma bifurcação de Hopf, onde o estado de equilíbrio estável se torna instável e ciclos limite surgem. Foi utilizado o método de Monte Carlo para análise do lugar incerto da bifurcação de Hopf, de modo a se obter a região mais provável de estabilidade para se projetar o ganho do controlador robusto.

Em [Gazi et al., 1995], um sistema de controle de um reator de polimerização foi estudado com base em simulações de Monte Carlo. Um grande número de funções monotônicas foi gerado aleatoriamente, sendo cada função gerada incorporada às ODEs do modelo do processo e, após a integração, foram obtidas as trajetórias dos estados para análise.

Em [Tejada et al., 2008], simulações de Monte Carlo são utilizadas para mostrar os efeitos de falhas sobre a estabilidade de malha fechada. É apresentado um estudo do efeito de mecanismos de recuperação de falhas (*rollback*, *reset* e *cold restart*) sobre a estabilidade do sistema em malha fechada. O problema abor-

dado foi a estabilidade da dinâmica longitudinal de uma aeronave AFTI-F16, representado por um modelo com quatro estados. É assumido que a aeronave está sujeita a falhas no computador devido a fontes de radiação.

Em [Wang e Stengel, 2002], a análise de robustez probabilística e síntese de sistemas não-lineares com parâmetros incertos são apresentados. Simulação de Monte Carlo é usada para estimar a probabilidade de instabilidade do sistema e violação de requisitos de desempenho sujeitas às variações dos parâmetros do sistema.

Em [Tempo e Ishii, 2007], alguns desenvolvimentos sobre a abordagem probabilística em controle é discutida. Os algoritmos de Monte Carlo e *Las Vegas Randomized* são apresentados, bem como algumas aplicações específicas dos mesmos, incluindo análise de estabilidade.

No presente trabalho, o método de Monte Carlo é usado para gerar o conjunto de atrasos aleatórios que são utilizados na simulação dos modelos dos NCSs, visando avaliar os efeitos das estatísticas dos atrasos para fornecimento das regiões mais prováveis de estabilidade [Batista e Jota, 2014]. A cada conjunto de atrasos aleatórios gerados e simulados, uma avaliação é feita na resposta temporal (ao degrau ou ao impulso ou à referência nula com a condição inicial de pelo menos um dos estados não nula) da saída do processo para verificar uma possível estabilidade ou instabilidade, como será detalhado no Capítulo 5. Para encontrar a região mais provável de estabilidade a partir da análise de vários conjuntos de dados, foi necessário adotar métodos de busca e convergência [Batista e Jota, 2014].

O método denominado de *Quicksort* foi usado para buscar a região de fronteira de estabilidade. O *Quicksort* é um método de ordenação proposto em 1962 por Hoare [Hoare, 1962]. O método é composto de duas etapas uma de partição (*Partition*) e outra de ordenamento ou seleção [Ziviani, 2006], [Júnior e Gomes, 2008], [Sedgewick, 1978]. A etapa de partição foi acoplada no algoritmo proposto, usando como pivô para partição o valor do atraso máximo [Batista e Jota, 2014].

A idéia do método do gradiente foi usada no algoritmo de análise proposto [Batista e Jota, 2014], de forma a caminhar a busca na direção de decréscimo

dos atrasos, para possibilitar a convergência do algoritmo, como será detalhado no Capítulo 5. O tradicional método do gradiente (descendente) parte de um ponto inicial e obtém a direção que produz o maior decréscimo de uma dada função, indicada pela informação contida no seu vetor gradiente. Como o gradiente corresponde à direção de maior crescimento da função, busca-se então caminhar na direção contrária. A cada passo (iteração) a função de interesse é avaliada e o processo se repete até que o algoritmo não obtenha mais ganhos significativos para análise desejada [Gonçalves, 2011], [Yuan, 2008]. O método do gradiente foi usado em aplicações de controle em [Spíndola, 2003] e de NCS em [Chunmao e Jian, 2006].

1.7 Organização da Tese

A presente Tese está organizada em 7 capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma visão geral da área de sistema em controle em rede. O objetivo deste capítulo é apresentar as abordagens atuais desta área de pesquisa e as limitações para aplicação prática. Ênfase é dada nas questões relacionadas aos atrasos variantes.

No Capítulo 3, é abordado o problema de NCS em sistemas reais e discutida algumas questões práticas de implementação. Descreve-se: o comportamento dos atrasos em NCSs implementados sob redes de acesso aleatório; questões relativas ao sincronismo e o detalhamento da plataforma utilizada nas implementações práticas deste trabalho, denominada NCS-CMUF. São apresentadas análises de atrasos reais medidos com a plataforma NCS-CMUF.

No Capítulo 4, são apresentados a modelagem das plantas e o projeto dos controladores utilizados nos estudos de caso.

No Capítulo 5, é apresentado o método proposto para determinação das regiões mais prováveis de estabilidade baseado no método de Monte Carlo e análise da resposta temporal. Um estudo simulado é apresentado para avaliação das regiões mais prováveis de estabilidade e dos efeitos da distribuição dos atrasos em NCSs.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados experimentais obtidos.

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões, as contribuições e as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte em NCS: Uma Análise Crítica

Networked Control System (NCS) é um tema emergente que requer a concorrência de ferramentas apropriadas para representação, análise e síntese de controladores, objetivando reduzir a lacuna existente entre os desenvolvimentos teóricos e suas aplicações práticas.

O objetivo deste capítulo é prover um melhor entendimento das ferramentas existentes aplicáveis a NCSs reais com atrasos variantes. Este capítulo apresenta um estudo de algumas contribuições relevantes publicadas na literatura e discute as limitações para aplicações reais, com ênfase nas questões relacionadas aos atrasos variantes. É destacada a importância de se considerar (de alguma forma), nas ferramentas de análise e síntese, os efeitos das estatísticas dos atrasos e a probabilidade de eventos incertos (presentes em geral em NCSs reais). As discussões e contribuições presentes neste capítulo foram publicadas em [Batista e Jota, 2013].

2.1 Visão Geral

Os sistemas de controle em redes (NCSs) têm recebido grande atenção em recentes pesquisas. Este estudo bibliográfico foi feito com ênfase nas questões práticas e discute as limitações para a aplicação real. São apresentadas diferentes

abordagens para modelagem de NCSs, enfatizando o impacto dos atrasos variantes na modelagem, análise e síntese de controladores. Apontam-se também direções futuras desta importante área tecnológica.

Uma importante questão na análise e projeto de NCSs é a forma com que os atrasos e o seus respectivos comportamentos dinâmicos são representados no modelo. Algumas abordagens incorporam os atrasos na matriz do sistema descrevendo-o como um sistema incerto variante no tempo [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2009]. Os atrasos são considerados variantes no tempo, geralmente, limitados a um ou dois períodos de amostragem em: [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2009], [Cloosterman et al., 2006], [Dritsas e Tzes, 2009], [Zhang et al., 2001] e o seu comportamento dinâmico é representado de forma limitada com taxas de variações suaves [Niculescu et al., 2003], [Seuret, 2011]. No trabalho de [Niculescu et al., 2003], por exemplo, considera-se que a derivada temporal dos atrasos está limitada entre 0 e 1 (amostra/período de amostragem) e, em [Seuret, 2011], entre -1 e 1. No entanto, os NCSs reais, sobretudo sob a Internet, são sistemas com rápidas variações de atrasos [Wang e Liu, 2008]. Além disso, a ocorrência de filas e desordenamento de pacotes, presentes em NCSs reais, implica em atrasos com taxas de variações negativas, o que deve ser considerado na análise. Num NCS real sob redes de acesso aleatório, como a Internet, os atrasos variáveis com taxas de variações elevadas são normalmente encontrados, como pode ser visto nos atrasos medidos e apresentados em [Peng et al., 2009] e [Park e Lee, 2001] e também em dados reais medidos conforme será apresentado no Capítulo 3. Vale destacar que em NCSs reais ocorrem atrasos discretos, sendo os mesmos não diferenciáveis.

Além disso, dependendo das condições de tráfego, a hora do dia, o dia da semana, e assim por diante, os atrasos podem facilmente exceder vários períodos de amostragem regulares. Nos atrasos medidos em um NCS real com alguns *links* de rede apresentados em [Martins, 2009], em determinadas condições de tráfego na rede verificou-se a presença de atrasos médios medidos da ordem de 430 ms (e em alguns instantes ultrapassando 600 ms com derivadas bem acentuadas), sendo

um dos estudos de caso apresentados pelo autor o controle de uma malha de vazão com constante de tempo de 1,3 s e amostragem de 125ms. Estes fatos corroboram com a afirmativa de que os atrasos realmente podem ultrapassar vários períodos de amostragem regulares.

Independentemente da forma como os fenômenos reais inerentes aos NCSs são representados, especialmente o comportamento dinâmico dos atrasos que precisa ser de alguma forma incorporado, um grande desafio é como obter estimativas das regiões de estabilidade reais de um NCS. Embora existam na literatura trabalhos com provas teóricas de estabilidade para problemas intitulados como NCSs, na prática a prova absoluta ou garantia total de estabilidade de um NCS real (que, está sujeito a eventos incertos não modelados realisticamente, de forma integrada) não é totalmente factível, sendo a análise da estabilidade de um NCS real uma tarefa muito complexa. Além disso, as ferramentas de simulação e de análise disponíveis na literatura, normalmente, têm limitações relativas à incorporação de todos os fenômenos reais presentes nos NCSs com atrasos aleatórios [Tian, 2010]. Em particular, estas podem levar a condições de síntese muito conservadoras, muito além do aceitável, a ponto de comprometer o desempenho para assegurar a estabilidade em qualquer condição de operação assumida (sendo esta factível ou não). Em [Heemels et al., 2010], apresenta-se uma comparação entre o grau de conservadorismo e complexidade numérica de algumas técnicas sobreaproximadas utilizadas para a análise da estabilidade de NCSs, com base em sobreaproximações politópicas de modelos de NCSs incertos.

A implementação de estratégias de controle apropriadas para NCSs é outro desafio que tem recentemente chamado a atenção de muitos pesquisadores. As estratégias adequadas para NCSs devem satisfazer requisitos de desempenho e de estabilidade (margem de fase, tempo de subida, tempo de acomodação, *overshoot*, etc), independentemente das condições reais de atraso e eventuais falhas na rede. Em condições realistas, dependendo das características da planta e dos atrasos na rede, é imperativo considerar a adoção de estratégias avançadas com algum mecanismo de adaptação, técnicas de compensação para mitigação dos efeitos dos

atrasos e de perdas de pacotes, ou até mesmo esquemas de controle chaveados. No entanto, esses refinamentos adicionam complexidade para a representação e a análise de estabilidade, portanto, seu uso deve ser considerado com parcimônia.

Os métodos de análise e síntese apresentados atualmente na literatura (classificados como robustos ou não), em geral, têm restrições no que se refere à faixa de validade para a aplicação e a implementação em casos reais utilizando a Internet. Geralmente, a estabilidade só é formalmente garantida por métodos determinísticos para variações de atrasos e perdas de pacotes muito limitadas. No entanto, em um NCS real, em rede compartilhada com condições de tráfego e eventos incertos, não é possível ter a garantia absoluta de que os atrasos e perdas de pacotes estarão sempre dentro dos limites máximos e mínimos pré-estabelecidos. Na realidade, estes são frequentemente ultrapassados, mas por instantes de tempo quase nulos. Assim, haverá sempre a probabilidade de o sistema real se tornar instável. Na prática, os NCSs estão sempre sujeitos a eventuais violações das condições nominais utilizadas no projeto e, para uma análise realista, deve ser considerado (de alguma forma) que estas condições podem ser (ou não) plenamente atendidas.

Neste capítulo, foram examinadas publicações da literatura sobre o assunto para lançar luz sobre algumas questões acima mencionadas no que refere a representação, análise e síntese de NCSs para aplicações nos casos práticos.

2.2 Ferramentas de Análise e Projeto de NCSs

Na literatura, vários estudos têm sido publicados com muitas contribuições relevantes para o tratamento de alguns dos problemas de NCSs, principalmente, abordados de forma isolada. Com relação aos atrasos variantes, estes provocam irregularidades no período de amostragem e em um NCS real podem assumir valores fracionários em relação ao período de amostragem. Em geral, os atrasos considerados podem ser agrupados em duas categorias e têm as seguintes características: i) são variáveis e limitados a um período de amostragem [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2006], [Dritsas e Tzes, 2009], [Zhang et al., 2001] e, em al-

guns poucos casos, os atrasos são também limitados a dois ou três períodos de amostragem [Cloosterman et al., 2009] com derivada temporal limitada [Niculescu et al., 2003], [Gao et al., 2008] ou não [Heemels et al., 2010], [Dritsas e Tzes, 2009], [Zhang et al., 2001]; ii) são tidos como determinísticos [Tipsuwan e Chow, 2003] e considerados fixos ou limitados a um valor máximo ou médio para as análises de condições operacionais específicas [Martins e Jota, 2009], [Khan et al., 2008]. Existem alguns modelos que descrevem variações arbitrárias de atrasos limitados a um valor superior a um período de amostragem regular [Cloosterman, 2008], [Yang et al., 2004]. Os efeitos presentes em NCSs reais, tais como, amostragem irregular [Seuret, 2011], rejeição de mensagem [Halevi e Ray, 1988b], ruídos presentes no canal de comunicação [Goodwin et al., 2008], perdas de pacotes [Wang e Yang, 2010], [Tian e Levy, 2008], [Sahebsaraa et al., 2008], [Zhang et al., 2001], [Zhang e Yu, 2007] e reordenamento de pacotes [Li et al., 2009], são em geral, tratados de forma isolada ou combinados com determinada condição de atraso (na maioria dos casos, limitados a um período de amostragem).

A modelagem de NCSs pode ser realizada com base no tempo contínuo, tempo discreto ou usando modelos híbridos. No que diz respeito aos modelos no tempo discreto, a abordagem em espaço de estados aumentada [Halevi e Ray, 1988a] é mais amplamente utilizada. Neste caso, o NCS é representado como um sistema linear com parâmetros variantes. A metodologia consiste em encontrar um modelo estendido com uma matriz aumentada e o novo sistema incorpora os atrasos na rede. Vários trabalhos fazem uso desta estrutura de modelo, em que os atrasos na entrada são aproximados por um sistema incerto variante no tempo usando a representação em espaço de estados aumentada [Halevi e Ray, 1988a], [Halevi e Ray, 1988b], [Cloosterman et al., 2006], [Cloosterman et al., 2009], [Cloosterman et al., 2010], [Heemels et al., 2010], [Zhang et al., 2001], [Wu et al., 2005]. A aplicação prática desta representação para atrasos menores que um período de amostragem, apesar de amplamente utilizada na literatura, é limitada, dadas as particularidades de um NCS real sob a Internet. Isto

porque os atrasos costumam ser frequentemente superiores a um período de amostragem. A generalização de tais modelos para o caso de atrasos com grandes variações, incorporando as perdas de pacotes e amostragens irregulares, não é uma tarefa trivial [Cloosterman et al., 2010]. Em [Cloosterman et al., 2009], usando a mesma representação, um NCS com atrasos variantes menores que dois períodos de amostragem foi modelado. É importante salientar que, o aumento da dimensão do sistema e as dificuldades para representar todos os fenômenos presentes em um NCS real de uma forma integrada são limitantes desta representação aumentada para fins de projeto de controle. Um aspecto positivo é que esta representação é particularmente adequada para a análise de estabilidade, no entanto, a representação da incerteza dos parâmetros é tipicamente realizada utilizando métodos sobreaproximados [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2009], [Cloosterman, 2008], o que resulta em um grau de conservadorismo. Vale destacar que o sistema aumentado contém os autovalores do sistema original [Silva, 2011].

No que diz respeito à representação de incertezas, em modelos de NCSs, decorrentes das variações de atraso e com limites de incertezas conhecidos, duas abordagens têm sido comumente utilizadas: i) incertezas politópicas [Gielen et al., 2008], [Cloosterman et al., 2006], [Heemels et al., 2010] e ii) incertezas limitadas em norma [Shi et al., 2006], [Dritsas e Tzes, 2009], [Wu et al., 2011]. Também têm sido utilizados modelos politópicos com incertezas aditivas limitadas em norma [Heemels et al., 2010], [Donkers et al., 2009], [Donkers et al., 2011]. Os métodos politópicos sobreaproximados estão amplamente descritos na literatura, como discutido em [Heemels et al., 2010], [Gielen et al., 2008]. Alguns trabalhos usam a técnica clássica de análise de estabilidade de um politopo de matrizes a partir de um teste de factibilidade de LMIs descritas nos vértices do domínio de incertezas (*based on interval matrices*) [Cloosterman et al., 2006]; outros usam diferentes formas para construir uma sobreaproximação da matriz incerta, como por exemplo, série de Taylor [Hetel et al., 2006], [Heemels et al., 2010], teorema de Cayley-Hamilton [Gielen et al., 2010], [Heemels et al., 2010], forma de Jordan

[Heemels et al., 2010], [Olaru e Niculescu, 2008] ou método de *Gridding* [Heemels et al., 2010], [Donkers et al., 2009], [Donkers et al., 2011].

Outra representação de NCS também encontrada frequentemente na literatura é a modelagem de sistemas no tempo contínuo com controlador digital, por meio de um modelo no tempo contínuo com atraso na entrada usando a abordagem em espaço de estados [Fridman et al., 2004]. Nesta representação, considera-se que a entrada de controle é constante por partes e um ganho estático de realimentação de estados é utilizado. A malha fechada é então reduzida a uma equação diferencial com atraso e a sua estabilidade pode ser avaliada por meio de métodos como Lyapunov-Krasovskii [Gao et al., 2008], [Seuret, 2011], [Chen e Zheng, 2011], [Seuret e Johansson, 2012] ou Lyapunov-Razumikhin [Huang e Nguang, 2008], [Gielen e Lazar, 2009]. As ferramentas de análise existentes no âmbito da abordagem de sistemas incertos com atrasos variantes na entrada são, em geral, baseadas em métodos de Lyapunov determinísticos. Portanto, a estabilidade não pode ser garantida por estes métodos para atrasos com o limite superior ao atraso máximo fixo (constante) [Liu e Fridman, 2009]. No entanto, em muitos sistemas, o limite superior que mantém a estabilidade pode ser maior do que o atraso máximo fixo [Liu e Fridman, 2009] (ver também as discussões sobre os fenômenos de *Quenching* em [Liu e Fridman, 2012], [Louissel, 2001], [Papachristodoulou et al., 2007] e referências internas).

Esta representação com atraso na entrada foi aplicada para modelagem de NCSs em [Seuret, 2011], [Seuret e Silva Jr, 2011] e, para sistemas com amostragem irregular, em [Seuret, 2009], [Seuret, 2010]. Os autores consideraram que o mesmo atraso ocorre em todos os estados e que são sempre menores do que um período de amostragem. Vale destacar que, em um NCS real, se o controlador é dinâmico (com memória) e disparado por tempo, é necessário representar explicitamente os atrasos τ_{sc} (entre o sensor e o controlador) e τ_{ca} (entre o controlador e o atuador), uma vez que o ponto exato (entre o sensor e o controlador ou entre o controlador e o atuador) onde o atraso ocorre no elo de realimentação tem influência no desempenho da malha fechada. No entanto, um

controlador estático (sem memória ou invariante no tempo) pode ser analisado como se estivesse perto do atuador, sem afetar a estabilidade da malha fechada [Hespanha et al., 2007]. Em outras palavras, para a análise τ_{sc} e τ_{ca} podem ser considerados como se estivessem juntos [Zhang, 2001]. Vale ressaltar que, se o controlador é disparado por evento, o cálculo executado pelo controlador será o mesmo independente do ponto onde o atraso ocorra no *loop*.

NCSs também podem ser tratados como sistemas híbridos. Uma visão geral da aplicação da teoria de controle híbrido em NCSs, abordando os aspectos de modelagem e controle, é apresentado em [Yin et al., 2011]. Outra possibilidade para a representação de NCS é o uso da abordagem de sistemas impulsivos, como apresentado em [Chen e Zheng, 2011]. A ideia básica desta representação é que o NCS pode ser visto como um sistema híbrido composto por um subsistema impulsivo e um subsistema contínuo. A abordagem de sistemas impulsivos também foi utilizada em [Naghshtabrizi et al., 2007], [Naghshtabrizi et al., 2008].

Outros modelos alternativos para a representação de NCSs também foram adotados. Em [Yang et al., 2011], por exemplo, um modelo de sistema chaveado baseado no operador delta [Goodwin e Middleton, 1992] é utilizado para descrever um NCS capaz de lidar com perdas de pacotes e atrasos variáveis. A representação de NCSs como um problema Lurie foi abordada em [Zeng et al., 2011]. Nesses trabalhos, os atrasos são considerados variantes no tempo e limitados.

Como pode ser visto, muitos estudos foram publicados focando modelagem de NCSs, no entanto, existe uma grande dificuldade em estabelecer um modelo realístico, que incorpore todos os fenômenos presentes em um NCS real e, ao mesmo tempo, seja factível para a síntese de controladores e adequado para ser analisado pelos métodos de análise de estabilidade disponíveis.

Em relação às estratégias de controle aplicadas a NCSs, desde os anos 1980 estudos estão sendo realizados usando técnicas clássicas, como PID e suas derivações (P, PI, PD) [Lian et al., 2002], [Khan et al., 2008], [Godoy et al., 2010], [Takarabe et al., 2010], acoplados ou não com Preditor de Smith com características adaptativas [Du e Du, 2009], [Lai et al., 2008]. Em outras propostas,

foram adotadas estratégias mais avançadas, como as leis de controle preditivas/adaptativas [Wang et al., 2011], [Pin e Parisini, 2011], [Jota, 1987], [Goodwin et al., 2004], robustas H_2 e H_∞ [Gao et al., 2008], [Goktas, 2000], [Wang e Yang, 2010], [Yang e Li, 2009], com compensação explícita do sinal de controle [Martins e Jota, 2009], com compensação dos atrasos [Zhang et al., 2001], [Zhang et al., 2011], [Yang e Wang, 2005], controle baseado em eventos [Wang e Lemmon, 2011], controle ótimo descentralizado [Rotkowitz et al., 2010], controle estocástico ótimo [Nilson, 1998], [Yang et al., 2004], sistemas de controle chaveados [Wang e Liu, 2008], [Yu et al., 2009], [Donkers et al., 2011], [Xie, 2011], teoria de redes neurais [Zhang e Wang, 2010], controladores baseados em lógica fuzzy [Dezong et al., 2011], parametrização de Youla [Goodwin et al., 2008], teoria da perturbação [Tipsuwan e Chow, 2003], entre outras. Estas estratégias têm contribuído para melhorar o desempenho e compensar ou minimizar, de forma mais eficaz, os efeitos das incertezas presentes nos NCSs, reduzindo assim, a probabilidade do sistema tornar-se instável.

Em alguns estudos, técnicas de controle avançado têm sido utilizadas para mitigar os efeitos dos atrasos e das perdas de pacotes. Por exemplo, em [Liu et al., 2007], uma proposta denominada *Networked Predictive Control* foi usada para compensar os efeitos dos atrasos e das perdas de pacotes, com a introdução de um compensador no canal entre o controlador e o atuador. Goodwin e colaboradores [Goodwin et al., 2004] propuseram um controlador em rede preditivo baseado em modelo denominado MPNC (*Model Predictive Networked Controller*) testado em uma configuração de escala laboratorial para controle de nível. Em [Goodwin et al., 2008] foi apresentada uma arquitetura de NCS, com base na parametrização Youla, conhecida como *Networked Youla Architecture*, no qual um *loop* interno foi incluído, como na estratégia de controle baseado em modelo interno, sendo o modelo usado para representar a dinâmica do *link* de comunicação. Tian e colaboradores [Tian et al., 2012] propuseram uma técnica preditiva de compensação usando métodos de controle baseados em pacotes. A cada período de amostragem, o controlador envia para o atuador os valores os sinais de

controle preditos (de acordo com os possíveis valores de atrasos) em um pacote, que são armazenados num *buffer* intermediário no atuador. O método de controle baseado em pacotes também é usado em [Tian, 2010], [Chaillet e Bicchi, 2008], [Zhao et al., 2009], [Rahmani e Markazi, 2013].

Em relação às metodologias utilizadas para a análise de estabilidade de NCSs, vários estudos publicados na literatura são baseados na teoria de Lyapunov, tais como por exemplo, [Seuret e Silva Jr, 2011], [Cloosterman et al., 2009], [Heemels et al., 2010], [Seuret, 2011], [Dritsas e Tzes, 2009], [Gao et al., 2008], [Figueredo et al., 2009], [Figueredo et al., 2010] e referências internas, diferenciado-se estes entre si pela função de Lyapunov adotada e pela forma como as incertezas são modeladas. Em geral, a análise de estabilidade do sistema de malha fechada é realizada utilizando função de Lyapunov quadrática [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2006], [Dritsas e Tzes, 2009] ou funções (ou funcionais) de Lyapunov Krasovskii [Gao et al., 2008], [Seuret, 2011], [Chen e Zheng, 2011] com soluções via LMIs [Cloosterman et al., 2006], [Liu et al., 2007], [Cloosterman et al., 2009], [Dritsas e Tzes, 2009], [Zhang et al., 2001], [Heemels et al., 2010], [Li et al., 2004].

A teoria de Lyapunov é amplamente utilizada para análise de estabilidade de sistemas com atrasos, como por exemplo em [Leite, 2005], [Caldeira et al., 2011], [Miranda e Leite, 2011], [Leite e Miranda, 2008], [Miranda e Leite, 2008], [Leite et al., 2007], [Viana et al., 2010] e também para análise de sistemas incertos [Coutinho e Trofino, 2000], [Coutinho, 2003]. Para análise de estabilidade de sistemas com atraso duas classificações tem sido exploradas na literatura [Valmórbida et al., 2007]: - estabilidade independente do atraso (que consiste em determinar se o sistema é estável independentemente da magnitude do atraso);- estabilidade dependente do atraso (que se preocupa em definir a máxima magnitude do atraso tal que o sistema seja estável). O foco principal dos trabalhos baseados na teoria de Lyapunov em NCSs tem sido a obtenção de resultados menos conservadores para determinação do limite do atraso máximo permitido (MADB - *Maximum Allowable Delay Bound*) [Kim et al., 2003], [Ma et al., 2007],

[Yan et al., 2007] ou para determinação do tempo máximo entre duas transmissões de dados chegadas ao nó controlador (sinais de controle) em que o sistema em malha fechada permanece estável, também conhecido como o máximo intervalo de transferência permissível (MATI - *Maximum Allowable Transfer Interval*) [Walsh et al., 1999], [Zhang et al., 2001], [Chen e Zheng, 2011], [Schendel, 2008], [Naghshabrizi et al., 2007], [Yue et al., 2004], [Yue et al., 2005].

Uma das principais limitações das abordagens baseadas na teoria de Lyapunov, além da dificuldade em encontrar a função candidata é o conservadorismo inerente a esses métodos. Mais detalhes sobre a construção de funções de Lyapunov podem ser encontrados em [Papachristodoulou, 2004] e [Peet et al., 2006]. Nessas condições, o principal desafio é encontrar limites menos conservadoras de estabilidade [Heemels et al., 2010], [Gielen et al., 2010], [Cloosterman et al., 2009], [Seuret, 2011], [Cloosterman, 2008], [Donkers et al., 2009]. Outro problema é a forma de representar um NCS real que possui além de um número relativamente grande de incertezas, estruturas de chaveamento e outras estruturas de controle avançado (como, por exemplo, esquemas de controle adaptativos), de um modo viável para a implementação desses métodos. Na maioria destes casos, a estabilidade é garantida formalmente para atrasos limitados a um [Heemels et al., 2010], [Zhang et al., 2001], [Dritsas e Tzes, 2009], [Cloosterman et al., 2006] ou dois períodos de amostragem [Cloosterman et al., 2009] regulares. No entanto, como já dito anteriormente, em um sistema de controle sob uma rede de acesso aleatório, não é possível garantir que os atrasos ficarão confinados ao intervalo de valores considerado e, na prática, haverá sempre uma possibilidade do sistema real, eventualmente, tornar-se instável.

Quando o atraso real ultrapassa o valor máximo permitido, este evento em geral, é considerado como se fosse uma perda de pacote [Zhang et al., 2001], [Zhang e Yu, 2007], [Sahebsaraa et al., 2008], [Tian e Levy, 2008], [Wang e Yang, 2010], [Zhang et al., 2008]. No entanto, as perdas de pacotes são normalmente limitadas a um número máximo de perdas consecutivas [Wang e Yang, 2010] ou a taxa percentual de perda é restrita a um pequeno valor

[Zhang e Yu, 2007]. Hespanha e colaboradores [Hespanha et al., 2007] discutem a estimação de estado em redes com perdas. A estimativa do estado é calculada de forma recursiva usando um filtro de Kalman variante no tempo e as perdas são modeladas como um processo de Bernoulli. A fim de permitir uma maior taxa de perdas, os autores avaliam os benefícios do emprego de pré-processamento das medições antes da transmissão para a rede [Hespanha et al., 2007], [Xu e Hespanha, 2005] através de sensores inteligentes. No entanto, nestas propostas, são tratadas apenas a questão das perdas de pacotes e os atrasos da rede (presentes em NCSs reais) foram negligenciados [Hespanha et al., 2007], [Xu e Hespanha, 2005].

Os problemas e as limitações acima mencionados levou à busca de outros métodos de análise. Um destes métodos é baseado no conceito de estabilidade estocástica [Kozin, 1969] em que a estabilidade do sistema é considerada relativa ou o sistema é dito ser quase certamente (*almost sure*) estável [Shi et al., 2006]. Abordagens probabilísticas para a análise da estabilidade de NCSs foram utilizadas em [Shi et al., 2006], no qual a matriz do sistema é representada com incertezas limitadas em norma. A estabilidade no sentido de Lyapunov exige que, para qualquer inteiro positivo $\epsilon > 0$, existe um tempo $T > 0$, tal que, para qualquer instante $k \geq T$, $x_k \leq \epsilon$ (onde x_k representa o estado no tempo k). Em outras palavras, todas as trajetórias dos estados ao longo do tempo (começando em uma dada condição inicial), devem estar confinadas a uma região limitada e definida pelo parâmetro ϵ . Para a estabilidade probabilística, no entanto, permite-se que x_k seja maior que ϵ para qualquer $k > 0$ e para qualquer $\epsilon > 0$ finito, desde que tenha pequena probabilidade (arbitrária) de ocorrência [Shi et al., 2006]. Por exemplo, em [Yang et al., 2004], a teoria de controle estocástico ótima foi utilizada na concepção de um controlador LQG (Linear Quadrático Gaussiano) assumindo que o atraso pode ser maior do que um período de amostragem e representado por um processo de Markov [Yang et al., 2004].

Em [Peng et al., 2009], um critério para a análise de estabilidade e síntese de controladores com base em uma formulação robusta foi derivado. Foi utilizada

uma função de Lyapunov-Krasosviskii que considera a probabilidade de os atrasos ocorrem em diferentes escalas de tempo. Também em [Peng et al., 2009], para o sistema representado pela eq. 5.1, a condição da síntese proposta resultou em ganhos na ordem de 10^{-6} . Ganhos muito pequenos permitem evidentemente um aumento no atraso máximo, mas resultam em uma restrição significativa no desempenho em aplicações reais. Uma estratégia de controle baseada em distribuição estocástica, que considera os atrasos com uma dada função de densidade de probabilidade conhecida, também foi adotada por Zhang e colaboradores em [Zhang, 2009], [Zhang e Wang, 2009] e em [Yu, 2011].

Uma metodologia alternativa para análise de NCSs é o uso de atrasos fixos (adotando os valores máximos ou a média), em que, diferentemente das abordagens anteriormente apresentadas, a análise de estabilidade com atrasos fixos está limitada a condições específicas de operação (que dificilmente podem ser garantidas em NCSs reais). Sob certas condições de operação, a estabilidade é, em geral, avaliada por meio de métodos clássicos (lineares), tais como, Routh-Hurwitz [Martins e Jota, 2009] ou Lugar Geométrico das Raízes [Tipsuwan e Chow, 2003], análise no domínio da frequência [Lian et al., 2002], sensibilidade das raízes [Niculescu et al., 2003], análise da resposta temporal [Khan et al., 2008] ou usando algoritmos numéricos de busca exaustiva, nos quais a região de estabilidade é plotada incrementalmente, aumentando o atraso e testando a estabilidade do sistema em malha fechada (isto é, verificado se todos os autovalores da matriz de estados do sistema tem magnitude menor do que um) [Zhang, 2001]. Esses métodos são mais comumente usados em estudos com ênfase em síntese de controladores para NCSs e que não focam a busca de soluções para o problema de análise de estabilidade, portanto, a estabilidade é garantida apenas para atrasos específicos. No entanto, em NCSs reais em redes de acesso aleatório os atrasos são variantes no tempo e o seu comportamento dinâmico devem ser considerados na análise.

O teorema do ganho pequeno também tem sido utilizado para analisar a estabilidade de NCSs [Fujioka, 2009], [Zhang e Yu, 2011]. Outras abordagens uti-

lizadas para a análise de NCSs são baseadas no conceito de passividade e restrições integrais quadráticas (IQC). Por exemplo, em [Kottenstette et al., 2008], os autores utilizaram o conceito passividade para avaliar a estabilidade de um NCS com atrasos (limitado a um período de amostragem), tomando como um exemplo numérico um manipulador robótico descrito no tempo contínuo e controlado com um controlador discreto PD (Proporcional+Derivativo). O uso de IQCs foi explorado em aplicações de NCSs em [Jönsson et al., 2007]. Uma visão geral sobre a aplicabilidade de IQCs para a análise da estabilidade é apresentado em [Löhning et al., 2008] e [Megretski e Rantzer, 1997].

No trabalho de [Sun et al., 2010] outra abordagem alternativa para análise de estabilidade de NCSs foi proposta, baseada no conceito de tempo de permanência ou *Dwell Time* (normalmente utilizado em sistemas chaveados [Sun et al., 2008]), utilizando um funcional de Lyapunov por partes. O método proposto em [Sun et al., 2010] restringe o número de ocorrências de “atrasos elevados” (inferiores a 3 períodos de amostragem) em um dado intervalo de tempo (uma única ocorrência em 100 amostras no exemplo apresentado pelos autores). Entretanto, em NCSs reais não é possível garantir que vai haver apenas uma ocorrência de “atrasos elevados” dentro do intervalo estabelecido. Desta forma não é possível ter a garantia absoluta da estabilidade. Além disso, dependendo do instante em que este “atraso elevado” ocorre, este pode provocar efeitos diferentes na malha fechada (de acordo com os estados em que o sistema se encontra naquele instante).

Com relação às aplicações e estudos de caso considerados, não é muito comum encontrar, na literatura, soluções de problemas reais, mas existe uma diversidade de tipos de contribuições relevantes, que, basicamente, podem ser agrupadas em: i) simulações de condições de rede e características operacionais por meio de *softwares* [Goodwin et al., 2008], [Heemels et al., 2010], [Cloosterman et al., 2006], [Cloosterman et al., 2009], [Kottenstette et al., 2008], [Woei e Ray, 1990], [Wang e Lemmon, 2011], [Dritsas e Tzes, 2009], [Khan et al., 2008], [Tian, 2010], [Shi et al., 2006], [Gao et al., 2008]; ii) implementações dos *links* de rede com dois computadores para simulação de processos reais [Zhang et al., 2001]

e iii) implementações em plataformas reais com links de rede e processos físicos [Martins e Jota, 2009], [Liu et al., 2007], [Lai et al., 2008], [Goodwin et al., 2004], [Jota, 1987].

O número de trabalhos que abordam os fenômenos presentes em NCSs reais de uma forma integrada é relativamente pequeno, por exemplo, em [Martins e Jota, 2009], os autores utilizaram uma combinação de atrasos variáveis e perdas de pacote em NCSs. Foi desenvolvido um algoritmo de compensação explícita do sinal de controle e, em caso de uma eventual perda da medida, é utilizada a estimativa do valor medido (baseado em modelo). A metodologia proposta tem grande potencial e viabilidade para a implementação prática; no entanto, devido à complexidade do controlador, apresenta limitações para a prova teórica de estabilidade. Em [Cloosterman, 2008], o autor combina perdas de pacotes (consideradas determinísticas) e atrasos variáveis limitados, onde o número de perdas de pacotes subsequentes é limitado e conhecido a priori. No trabalho de [Cloosterman, 2008] considerou-se que o sensor é *time-driven* e o controlador e o atuador são *event-driven*, portanto, uma perda de pacote entre sensor e controlador implica que a ação de controle não será calculada e não chegará ao atuador, assim como uma perda de pacote entre controlador e atuador. Portanto, independentemente se as perdas de pacotes ocorrem entre o sensor e o controlador ou entre o controlador e o atuador não haverá aplicação do sinal de controle.

Em [Cloosterman et al., 2009] são considerados os problemas de rejeição de mensagens e atrasos variáveis (na faixa de zero a dois períodos de amostragem), na modelagem, os atrasos da rede, entre sensor-controlador e controlador-atuador foram representados como um único atraso e a rejeição de mensagens entre o sensor-controlador não é permitida. Os efeitos deletérios da amostragem irregular e dos atrasos (entre o sensor e controlador) menores do que um período de amostragem foram analisados por Seuret [Seuret, 2011], usando o teorema de Lyapunov discreto. Apesar de apresentar resultados conservadores, a principal contribuição é considerar os efeitos de dois tipos de atrasos (transmissão e amostragem) separadamente. Seuret e Johansson [Seuret e Johansson, 2012]

também abordaram os problemas de erros de sincronização e atrasos variáveis em NCSs. Os atrasos são assumidos como sendo não-simétricos (isto é $\tau_{sc}(t) \neq \tau_{ca}(t)$ [Dilaneh e Laval, 2009]), com limites superior e inferior conhecidos, bem como as derivadas temporais limitadas a 1 amostragem por período de amostragem. Os autores utilizaram um controlador baseado em observador, mas as condições obtidas são conservadoras [Seuret e Johansson, 2012].

Em suma, para analisar e projetar controladores apropriados com limites de estabilidade realísticos, é necessário encontrar uma representação factível que produza soluções viáveis, eficientes e numericamente tratáveis para aplicações reais. Conforme explicado anteriormente, o maior problema está nas limitações para aplicação em casos práticos, principalmente para representar de uma forma integrada os efeitos de atrasos variáveis, amostragem irregular, perda de pacotes e também as incertezas nos outros parâmetros do processo e do controlador, de modo a se obter limites realísticos de estabilidade. Além disso, as perdas de pacotes introduzem aleatoriedade inevitável na dinâmica do sistema e a noção clássica de estabilidade para sistemas determinísticos no sentido de Lyapunov não é a abordagem mais apropriada [Shi et al., 2006]. E, portanto, torna-se necessário trabalhar com o conceito de estabilidade probabilística e considerar (de alguma forma) a probabilidade de eventos incertos ocorrerem ou não. Neste contexto, é importante relacionar as propriedades de estabilidade do sistema com possíveis variações rápidas do atraso [Michiels et al., 2004] e com as estatísticas dos atrasos.

2.3 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentada uma revisão dos aspectos de representação, análise e síntese de NCS, destacando as contribuições e limitações das ferramentas de análise atuais para aplicação em casos práticos com ênfase nos efeitos dos atrasos variantes. Uma grande dificuldade está em encontrar funções que descrevam realisticamente as variações dos atrasos que ocorrem em NCSs reais. Constatou-se que, os fenômenos presentes em NCSs reais são representados de

uma forma limitada, poucos resultados experimentais são encontrados na literatura e as ferramentas de análise atuais (principalmente com base na teoria de Lyapunov com métodos determinísticos e sobreaproximados) fornecem resultados conservadores. As discussões apresentadas indicam a importância de aprofundar os estudos sobre as ferramentas que incorporam a probabilidade de eventos incertos (presentes em NCSs reais) ocorrem ou não e a probabilidade das condições nominais utilizadas no projeto serem (ou não) plenamente atendidas.

O conhecimento das estatísticas dos atrasos em NCSs é importante para determinar a estratégia de compensação adequada e estas devem ser incorporadas à ferramenta de análise. Os parâmetros do controlador poderiam ser adaptados de acordo com as estatísticas dos atrasos para melhorar o desempenho ou garantia de estabilidade. Se o projetista assume que a probabilidade de ocorrência dos atrasos aleatórios são as mesmas (entre os valores mínimo e máximo escolhidos) e que os atrasos também podem permanecer fixos em, por exemplo, o valor máximo por um tempo relativamente longo (que não tem probabilidade significativa de ocorrência em NCSs reais), certamente isso levará a um projeto desnecessariamente conservador. Portanto, para análise e projeto de NCSs os atrasos aleatórios não devem ser considerados sempre (com 100% de certeza) inferiores a um limite de atraso máximo fixo, isso pode afetar o desempenho do NCS em aplicações reais ou até mesmo implicar em um controlador que não seja factível; a menos que, os atrasos da rede sejam sempre pequenos (inferiores ao valor máximo estabelecido) o que não é possível se garantir em um NCS real.

Capítulo 3

O Problema de Controle em Rede em Sistemas Reais

Apresenta-se neste capítulo uma breve introdução sobre os desafios de implantação de controle em rede em sistemas reais, destacando os modos de operação de NCS local e remoto. Dentre os problemas inerentes à aplicações reais de NCSs, ênfase é dada aos efeitos dos atrasos variantes, portanto, um estudo das características dos atrasos variantes sob redes de acesso aleatórios é apresentado. As estatísticas dos atrasos são analisadas com base em atrasos medidos em NCSs reais implementados sob a rede Internet. São apresentadas análises de atrasos medidos em NCSs com as estações locais e remotas distanciadas mais de 10km entre si e também em uma mesma subrede. Apresenta-se também uma descrição da plataforma utilizada para realização dos ensaios experimentais da presente Tese, denominada NCS-CMUF “*Networked Control System* - Centro de Monitoramento de Usos Finais” [Jota et al., 2009]. As estratégias de controle disponibilizadas pela plataforma NCS-CMUF que são utilizadas neste trabalho também são descritas e, são discutidas algumas questões de implementação prática, destacando a dificuldade de sincronização entre os relógios das estações locais e remotas.

3.1 Introdução

Um sistema de controle em rede pode operar em modo local ou remoto (Figura 3.1) e um dos grandes desafios das aplicações de NCS reais implementados sob a rede Internet é manter o NCS funcionando em modo remoto continuamente (24 horas por dia) sem interrupções, uma vez que a Internet está sujeita a falhas e desconexões. Outro grande desafio é estabelecer uma referência de tempo entre as estações locais e remotas (como será discutido na seção 3.3.3), de forma a manter o sincronismo e possibilitar um cálculo preciso do valor dos atrasos nas trocas de mensagens da rede para uma compensação adequada pelos controladores.

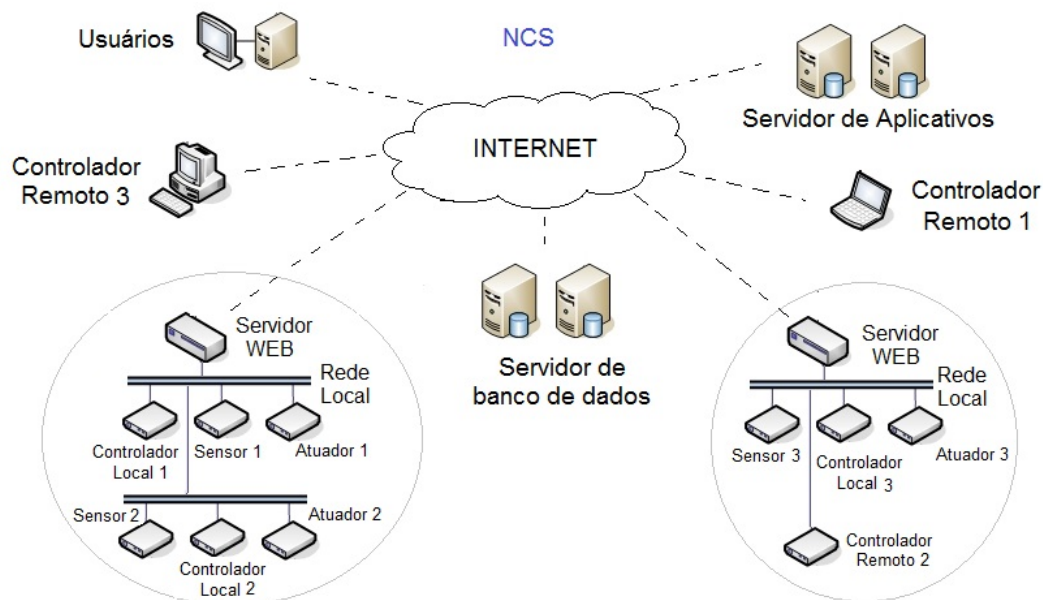


Figura 3.1: Arquitetura de controle em rede local e remoto.

No modo de operação local, embora a arquitetura de controle possa ser distribuída, as estações (sensor, controlador e atuador) se encontram fisicamente próximas à planta e podem se comunicar por meio de redes locais (por exemplo, CAN, Serial RS-232, DeviceNet, Profibus, Ethernet entre outras), podendo inclusive ser através de mais de um tipo de rede. No modo de operação remota, pelo menos uma das estações (sensor, controlador ou atuador) se encontra fisicamente distante da planta.

Em um NCS real operando em modo remoto, quando ocorre falhas e desco-

nexões prolongadas na rede torna-se necessário o chaveamento para o modo local para garantir que o sistema se mantenha sob controle. O chaveamento para o modo local pode ser disparado por meio de interrupções por tempo, uma vez que, se o *link* entre as estações locais e remotas é interrompido não é possível a troca de mensagens e a consequente geração de eventos por meio de mensagens.

Ressalta-se que, os atrasos e perdas de pacote podem apresentar diferentes características dependendo dos tipos de redes usadas no elo de realimentação, tanto para os modos de operação local ou remoto, sobretudo, se houver a inclusão ou não da rede Internet no *loop*. No presente trabalho ênfase é dada aos efeitos dos atrasos variantes em NCSs reais, fechados sob a Internet, operando em modo remoto. Um estudo do comportamento dos atrasos em NCSs sob redes de acesso aleatório, incluindo a análise de atrasos medidos em NCSs reais, é apresentado a seguir. A configuração utilizada na presente Tese para realização dos ensaios experimentais é ilustrada na Figura 3.2. Adotou-se uma plataforma de monitoramento e controle que utiliza mais de um tipo de rede incluindo a Internet, denominada NCS-CMUF (descrita em detalhe na seção 3.3.1). NCSs com diferentes processos físicos (que serão detalhados no Capítulo 4) foram implementados com as estações locais e remotas localizadas fisicamente no LCPI/UFMG e também no CPEI/CEFET-MG, estes dois laboratórios (LCPI e CPEI) estão distanciados mais de 10km entre si.

3.2 Comportamento dos Atrasos em NCSs Reais sob Redes de Acesso Aleatório

3.2.1 Atrasos em Redes IP

Os atrasos em sistemas de controle em rede reais, especialmente os implementados sob redes de acesso aleatório, como a Internet, podem apresentar grandes variações e diferentes parâmetros estatísticos. Observa-se que os atrasos são fortemente dependentes das condições de tráfego, que são extremamente vari-

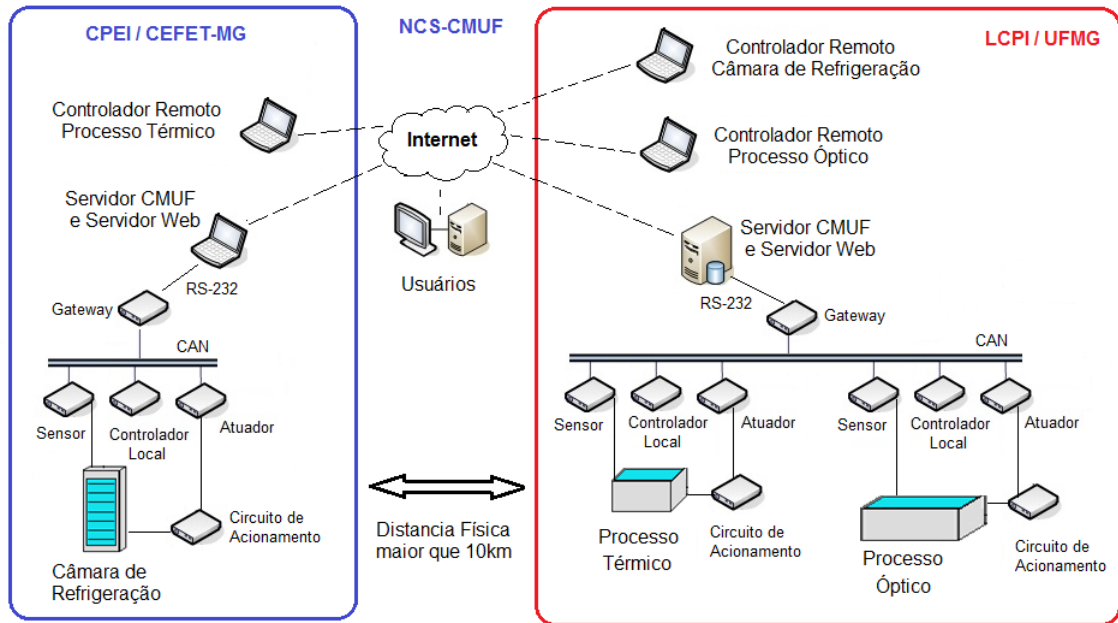


Figura 3.2: Arquitetura de controle em rede utilizada nos experimentos usando a plataforma NCS-CMUF.

áveis. Um estudo do tráfego na rede Internet e de várias outras características (tais como, a duração média de conexões HTTP, o tamanho das transações ao longo do tempo, etc) é apresentado em [Callahan et al., 2010]. De acordo com os autores, os estudos mostram que o tráfego na Web é *heavy-tailed* (com cauda pesada), ou seja, a maioria das mensagens na rede são curtas e poucas são longas [Callahan et al., 2010], [Barford e Crovella, 1998]. Em [Barford e Crovella, 1998], é também enfatizado que os servidores Web têm demandas altamente variáveis (como a variabilidade nas cargas de CPU e o número de conexões abertas) e que o tráfego na rede é estatisticamente auto-similar [Barford e Crovella, 1998], [Leland et al., 1994], ou seja, apresenta as mesmas propriedades estatísticas em várias escalas de tempo. Esta característica implica que os modelos simples (por exemplo, como processos de Poisson ou de Markov ou que utilizam uma única distribuição) são imprecisos [Leland et al., 1994]. Um estudo sobre a natureza auto-similar do tráfego na rede Ethernet é apresentado em [Leland et al., 1994] no qual destaca-se a importancia de utilizar-se modelos de tráfego baseados em processos estocásticos auto-similares.

Estudos apresentados na literatura como exemplo o de [Gielen et al., 2008] e

de [Tian, 2010] revelam a dificuldade de representar o comportamento temporal dos atrasos sob condições operacionais reais. Em [Gielen et al., 2008], os autores enfatizam que um dos grandes problemas em NCSs é como modelar os termos altamente não-lineares provocados pelos atrasos incertos e que o maior desafio na estabilização e controle preditivo de NCS é encontrar uma formulação para a modelagem que possa lidar com atrasos de forma eficaz [Gielen et al., 2008]. Tian [Tian, 2010] também destaca a dificuldade de descrever com formulações matemáticas os atrasos de transmissão em NCSs, já que algumas hipóteses e comportamentos considerados sobre atrasos de transmissão e perdas de pacotes podem não ser genericamente verdadeiras na prática [Tian, 2010]. É importante salientar que as falhas esporádicas na rede (ou mesmo nos sensores ou atuadores), que ocorrem de forma aleatória e afetam os atrasos (tornando-os excessivamente longos) devem receber um tratamento diferente na modelagem e síntese do controlador, ou seja, devem ser tratadas como falhas e não como atrasos excessivos. NCSs tolerantes a falhas são abordados em [Huo et al., 2009], [Patankar, 2003].

Poucos trabalhos disponíveis na literatura são baseados em resultados experimentais derivados de aplicações reais. No entanto, nos estudos em que os resultados práticos são apresentados, verifica-se que os atrasos têm diferentes formas de variação. Portanto, as estatísticas dos atrasos devem ser analisadas e consideradas de alguma forma no projeto do NCS e incorporadas às ferramentas utilizadas para a análise do comportamento do sistema controlado.

Alguns estudos, tais como, [Peng et al., 2009], [Tipsuwan e Chow, 2004], [Park e Lee, 2001], [Karakas, 2003], discutem as características de não uniformidade da distribuição dos atrasos de comunicação em NCSs sobre redes IP. Os protocolos TCP/IP e UDP podem resultar em diferentes desempenhos para os NCSs, uma vez que o protocolo TCP/IP provê maior confiabilidade e o UDP tem menor *overhead* (sobrecarga) [Ji e Kim, 2005]. A implementação de NCSs usando o protocolo UDP é discutida em [Epstein et al., 2007].

Análises do comportamento dos atrasos medidos experimentalmente sob redes IP apresentadas mais adiante (seção 3.2.2) e também em alguns trabalhos,

tais como, [Tipsuwan e Chow, 2004], [Karakas, 2003] e [Park e Lee, 2001], confirmam que os atrasos exibem parâmetros estatísticos variantes no tempo. Em [Tipsuwan e Chow, 2004], por exemplo, foi medido e analisado o tempo que um pacote leva para ir da estação local para a estação remota e retornar à origem (denominado *Round Trip Time* ou simplesmente RTT). O RTT foi medido a partir do laboratório (*Advanced Diagnosis and Control Laboratory*) da Universidade Estadual da Carolina do Norte para os destinos www.lib.ncsu.edu, www.visitnc.com, www.utexas.edu e www.ku.ac.th [Tipsuwan e Chow, 2004]. Os autores apresentaram a análise de algumas medidas estatísticas dos atrasos, tais como, o mínimo, a mediana, a média e os valores máximos. Nos testes mostrados em [Tipsuwan e Chow, 2004], a maioria dos atrasos estão em torno da mediana; no entanto, alguns atrasos são muito maiores do que a mediana e a média, mas ocorrem com baixa frequência (menor probabilidade). Os autores modelaram os atrasos com uma distribuição exponencial generalizada [Tipsuwan e Chow, 2004]. Em [Park e Lee, 2001], o RTT foi medido utilizando-se números diferentes (13, 15 e 26) de roteadores e distâncias entre as estações consideradas, de forma a observar a característica da comunicação. Demonstrou-se nos ensaios realizados que, com um maior número de roteadores, a distribuição do atraso se aproxima mais da distribuição gaussiana e com um menor número de roteadores, está mais próxima da distribuição exponencial. Estes resultados comprovam que a distribuição dos atrasos variam de acordo com a configuração da rede e, em especial, com a sua extensão geográfica [Park e Lee, 2001].

Em [Karakas, 2003] foi medido o RTT, o atraso em um só sentido (sem retorno) e as perdas de pacotes na Internet usando um equipamento de voz sobre IP (VoIP). Os autores demonstraram que a distribuição de alguns atrasos medidos tem uma forma semelhante à gama com cauda pesada (*gamma-like shape with heavy tail*). Karakas também tentou modelar a distribuição dos atrasos com distribuições gama, lognormal e Weibull [Karakas, 2003]. Em [Bovy et al., 2002], os RTTs também foram medidos e categorizados por classes, a saber: classe A (distribuição gama com cauda pesada) representava 84%; classe B (distribuição

gama com lob gaussiano ou triangular) 6,3%; classe C (distribuição gama) 2,8%; classe D (muitos picos) 5%; o restante de 1,5% não foi categorizado. Estes resultados reafirmam a constatação anterior de que os atrasos podem apresentar diferentes distribuições [Karakas, 2003] e [Bovy et al., 2002].

O perfil temporal (com variações de atrasos bruscas) e alguns parâmetros estatísticos (tais como, os valores mínimo e máximo, média, mediana e variância) dos atrasos, medidos experimentalmente usando a rede Internet, foram apresentados em [Tipsuwan e Chow, 2004], [Park e Lee, 2001], [Bovy et al., 2002] e [Karakas, 2003]. Em [Tipsuwan e Chow, 2004], o atraso médio é semelhante à mediana, os atrasos médios variam entre $580\mu s$ e $373ms$ e as medianas, entre $471\mu s$ e $315ms$. No entanto, grandes variações ocorrem nos atrasos máximos entre $86,2ms$ e $227,7s$. Em [Park e Lee, 2001], mostra-se que os atrasos médios variam entre $22ms$ e $31ms$ e os atrasos máximos entre $80ms$ e $200ms$. No trabalho de [Karakas, 2003], os atrasos médios variam entre $18,49ms$ e $51,69ms$ e o desvio padrão entre $3,02$ e $9,60ms$. Estes dados confirmam que os atrasos através de redes IP apresentam parâmetros estatísticos variantes no tempo, que vão desde alguns microsegundos a vários segundos. Esta variabilidade estatística deve ser avaliada e levada em conta na modelagem, análise e síntese de NCSs. A análise das estatísticas dos atrasos é essencial para tratar o problema de NCS de uma forma mais realística e obter controladores adequados (para assegurar, além da estabilidade, as condições de desempenho satisfatórias para aplicações reais).

3.2.2 Avaliação dos Atrasos em um NCS Real

Para prover uma análise dos atrasos medidos em um NCS real, que utiliza mais de um tipo de rede incluindo a Internet, adotou-se a plataforma NCS-CMUF (detalhada na seção 3.3.1). A medição dos atrasos reais na plataforma NCS-CMUF foi realizada utilizando a arquitetura da Figura 3.3. Os atrasos analisados foram medidos (com base em *timestamps* fornecidos com as mensagens) entre a mensagem de medição do sensor e a mensagem de reconhecimento do atuador, isto é, $\tau = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} + \tau_a$ (Figura 1.1). As mensagens nos ensaios analisados trafegam

em 4 níveis de rede distintos, sendo o *Link 1* a rede mundial de computadores Internet, o *Link 2* configurado como *localhost*, o nível 3 a rede serial RS-232 e o nível 4 a rede CAN.

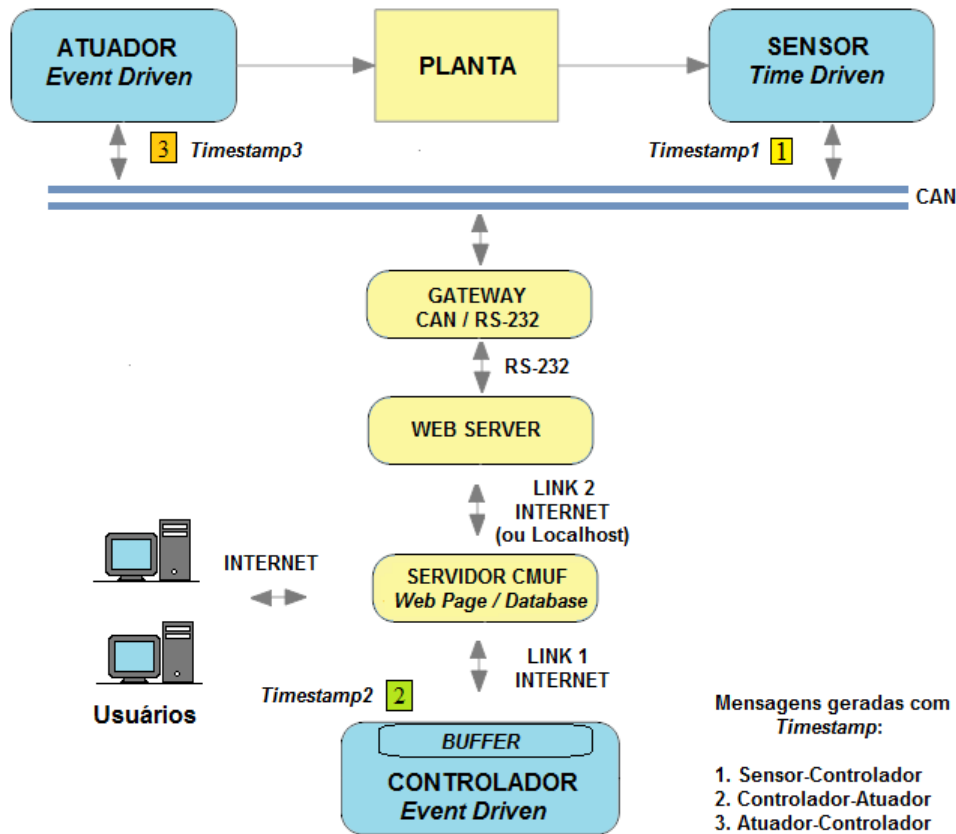


Figura 3.3: Arquitetura do controle remoto na plataforma NCS-CMUF.

Para assegurar a confiabilidade das medições, os atrasos medidos através dos *timestamps* das mensagens (com resolução de 4ms) foram previamente validados usando um aparelho analisador de rede que inclui um adaptador CAN-USB e o *software* PCAN-View ([Peak, 2010]) e também com um osciloscópio digital com decodificador de CAN (MSO6014A Agilent [Agilent, 2006]) (conforme apresentado no Apêndice C) que conferem grande precisão à medida de tempo.

3.2.2.1 Atrasos Medidos com as Unidades Remotas no Campus da UFMG

Nos ensaios realizados para medição dos atrasos apresentados a seguir os computadores do controlador remoto e do servidor CMUF estavam fisicamente no LCPI/UFMG (vide Figura 3.2) e foram configurados com IP fixo de uma subrede (150.164.xx.xx) da UFMG.

As figuras 3.4 a 3.10 apresentam o perfil dos atrasos medidos em milisegundos e o histograma com o número de ocorrência dos atrasos.

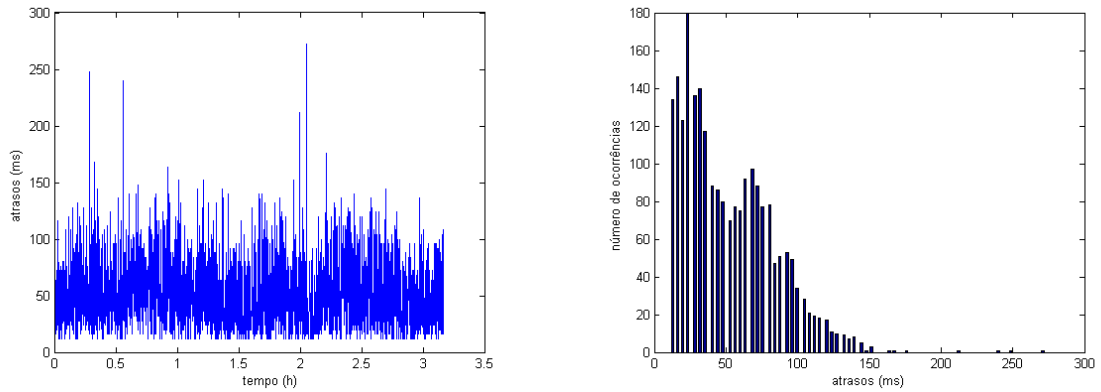


Figura 3.4: Ensaio 1: Atrasos medidos dia 17/10/11 (Início 18:35 horas, h=5s).

Os atrasos foram medidos com amostragem de 5s em um NCS real usando um filtro passa-baixas de primeira ordem com frequência de corte igual a $1/\tau_f$ (com $\tau_f=32s$, vide Tabela A.1). Os dados dos atrasos foram coletados em dias e horários distintos para uma melhor avaliação dos parâmetros estatísticos.

A Tabela 3.1 apresenta alguns parâmetros estatísticos dos atrasos medidos. Observa-se que os atrasos apresentaram variações significativas e diferentes distribuições. As distribuições dos atrasos e os valores de atrasos mínimo, máximo e médio medidos são também variantes no tempo. O valor do atraso máximo tem muito baixa probabilidade de ocorrência, por exemplo, no ensaio 7 observa-se que o atraso máximo foi muito maior do que a média ($\tau_{max} = \tau_{med} + 61\sigma$) e teve apenas uma ocorrência em 113.000 amostras. Neste ensaio, 99,7% (3σ) dos atrasos

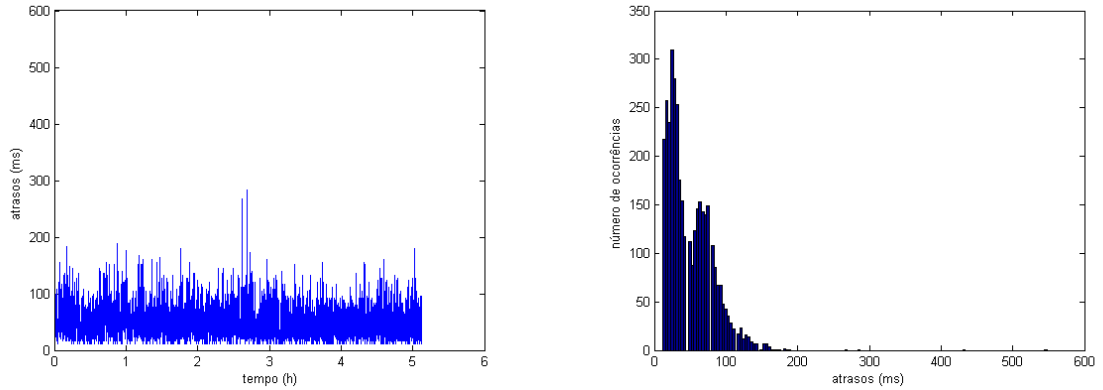


Figura 3.5: Ensaio 2: Atrasos medidos no dia 18/10/11 (Início 08:03 horas, $h=5s$).

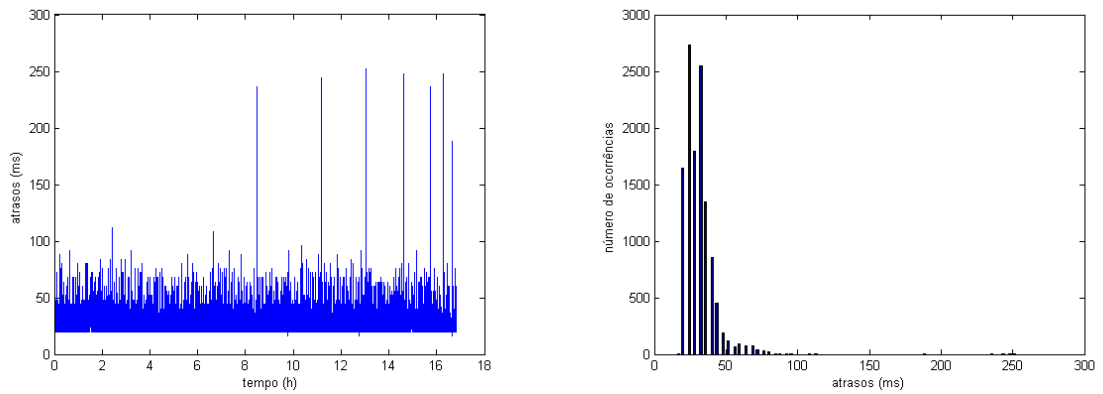


Figura 3.6: Ensaio 3: Atrasos medidos dia 19/10/11 (Início 14:55 horas, $h=5s$).

estão entre 8 e 25ms. Nos ensaios da Tabela 3.1 verificou-se uma variação nos atrasos mínimos entre 8 e 84ms, nos atrasos máximos entre 136 e 788ms e nos atrasos médios entre 14 e 102ms. Isto confirma que em NCS reais os parâmetros estatísticos dos atrasos são bastante dependentes das condições da rede.

3.2.2.2 Atrasos Medidos com as Unidades Remotas no Campus da UFMG e no Campus II do CEFET-MG

Para medição dos atrasos apresentados a seguir, o controlador remoto foi instalado no CPEI/CEFET-MG (configurado com um IP fixo da rede 200.131.xx.xx)

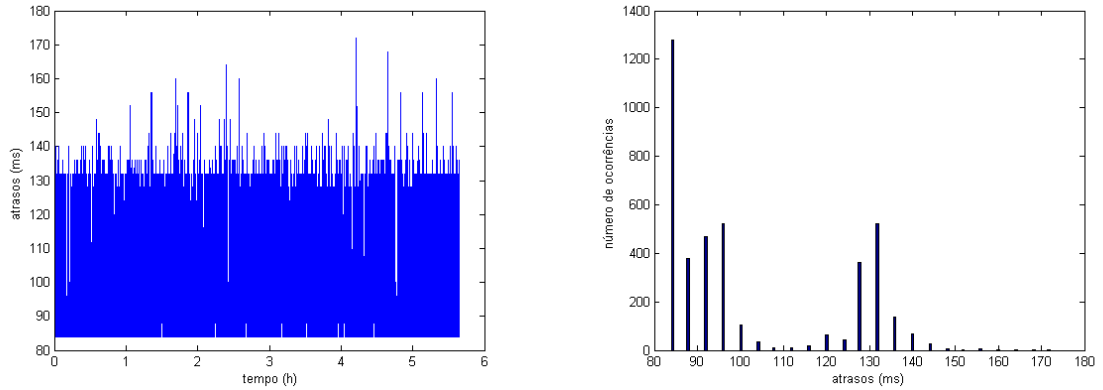


Figura 3.7: Ensaio 4: Atrasos medidos dia 26/10/11 (Início 15:33 horas, $h=5s$).

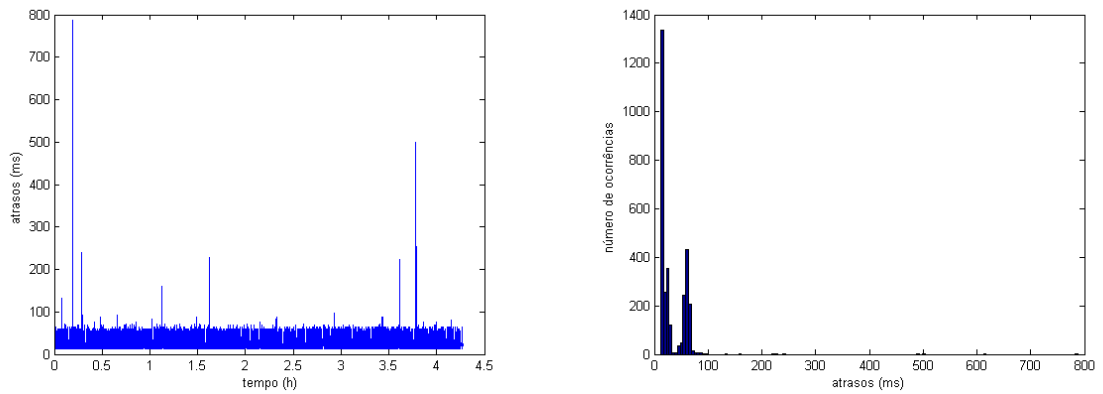


Figura 3.8: Ensaio 5: Atrasos medidos dia 27/10/11 (Início 07:33 horas, $h=5s$).

distante fisicamente mais de 10km do servidor CMUF instalado no LCPI/UFMG (configurado com um IP fixo da rede 150.164.xx.xx), conforme ilustrado na Figura 3.2.

As figuras 3.11 a 3.17 apresentam o perfil dos atrasos medidos em milissegundos e o histograma com o número de ocorrência dos atrasos. Os atrasos foram medidos usando diferentes períodos de amostragens de 1, 5 e 600 segundos. Constata-se variações de atrasos com derivadas muito elevadas.

Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros estatísticos dos atrasos medidos. Com esta estrutura de rede que tem maior distância física entre as unidades

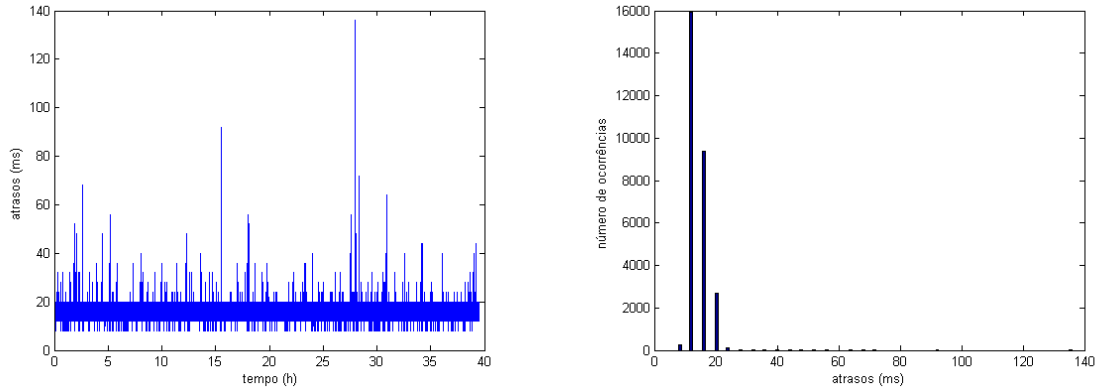


Figura 3.9: Ensaio 6: Atrasos medidos dia 02/01/12 (Início 16:08 horas, $h=5s$).

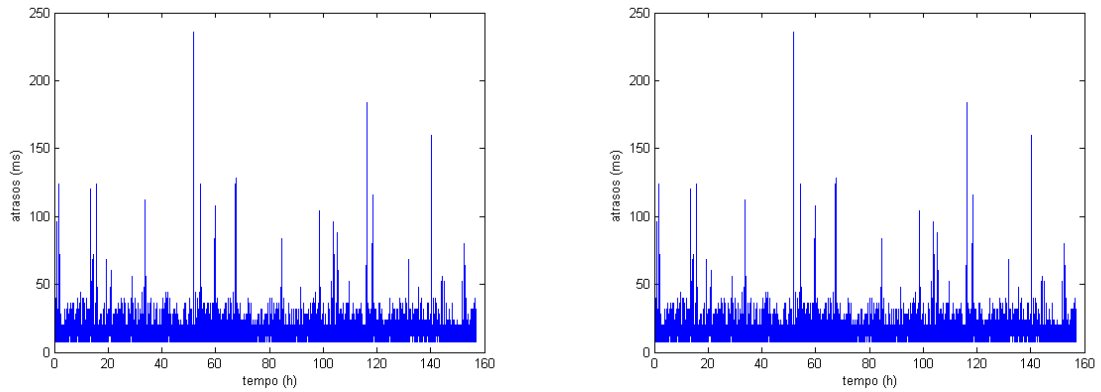


Figura 3.10: Ensaio 7: Atrasos medidos dia 24/08/12 (Início 12:36 horas, $h=5s$).

remotas e maior números de roteadores, observa-se a ocorrência de atrasos maiores. Atrasos entre 8ms e 64s foram observados, entretanto, o valor do atraso máximo tem baixíssima probabilidade de ocorrência, por exemplo, no ensaio 14 teve uma única ocorrência em mais de 5 dias de coleta de dados.

Com a análise dos atrasos medidos em NCSs reais constatou-se variações dos atrasos em um ampla faixa, podendo chegar facilmente a 3 ou 4 ordens de grandeza, como por exemplo, as variações obtidas nos ensaios 9 (entre 8ms e 8860ms) e 14 (entre 8ms e 64248ms) apresentados na Tabela 3.2. Se esta ampla faixa de variabilidade dos atrasos e o fato do atraso máximo ocorrer com baixa

Tabela 3.1: Parâmetros Estatísticos de Atrasos Medidos em um NCS real (S: sequência de ensaios, N: número de amostras, τ_{med} : atraso médio, τ_{min} : atraso mínimo, τ_{max} : atraso máximo, σ : desvio padrão, F: faixa [0-99,7%], D: desvio máximo).

S	N	τ_{med} (ms)	M (ms)	τ_{min} (ms)	τ_{max} (ms)	σ (ms)	F	D
1	2282	52	44	12	272	32	[12-148]	7σ
2	3690	50	40	12	548	33	[12-148]	15σ
3	12107	31	28	16	252	11	[16-65]	20σ
4	4068	102	92	84	172	20	[84-163]	3σ
5	3078	32	20	12	788	32	[12-126]	24σ
6	28439	14	12	8	136	3	[8-24]	37σ
7	113000	14	12	8	236	4	[8-25]	61σ

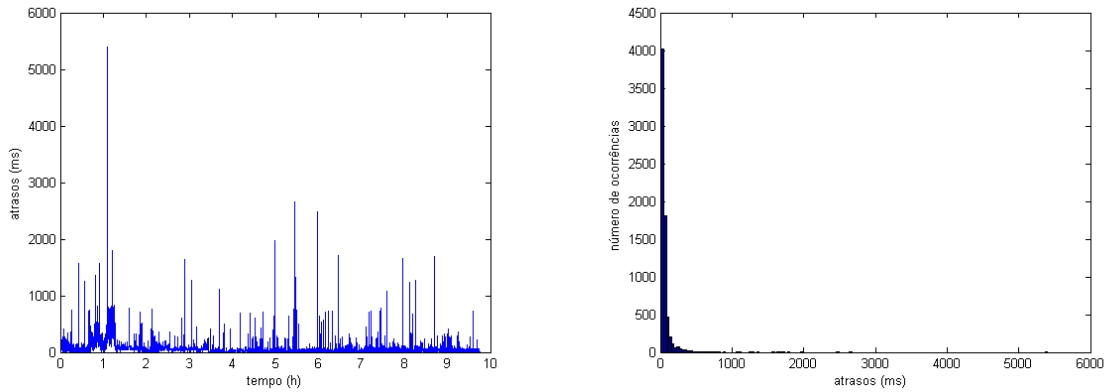


Figura 3.11: Ensaio 8: Atrasos medidos dia 19/04/13 (Início 09:27 horas, h=5s).

probabilidade não forem adequadamente considerados no projeto de NCS, ou seja, se considerarmos apenas o valor do atraso máximo como limite (no sentido de que o atraso possa permanecer 100% do tempo no valor do atraso máximo) para síntese dos controladores, certamente isto pode levar a condições de síntese desnecessariamente conservadoras ou até mesmo não implicar na síntese de um controlador factível. Portanto, estudos que consideram a probabilidade de ocorrência arbitrária dos atrasos na análise e projeto de NCSs merecem investigações.

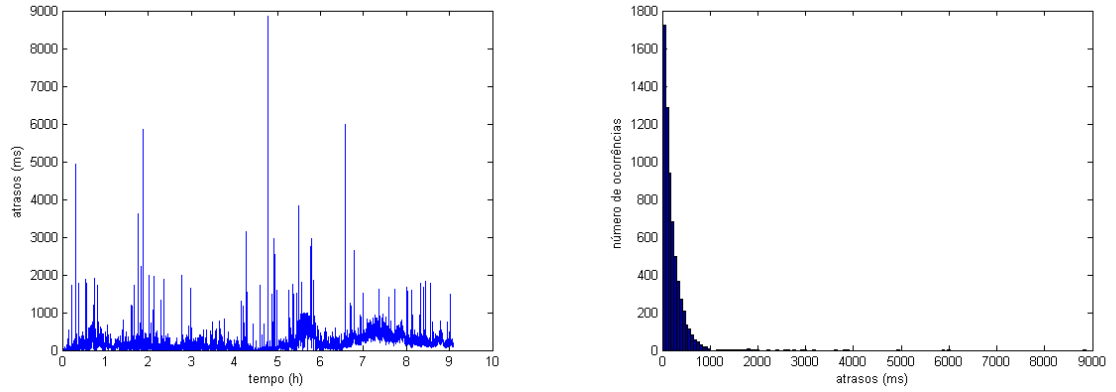


Figura 3.12: Ensaio 9: Atrasos medidos dia 23/04/13 (Início 08:43 horas, $h=5s$).

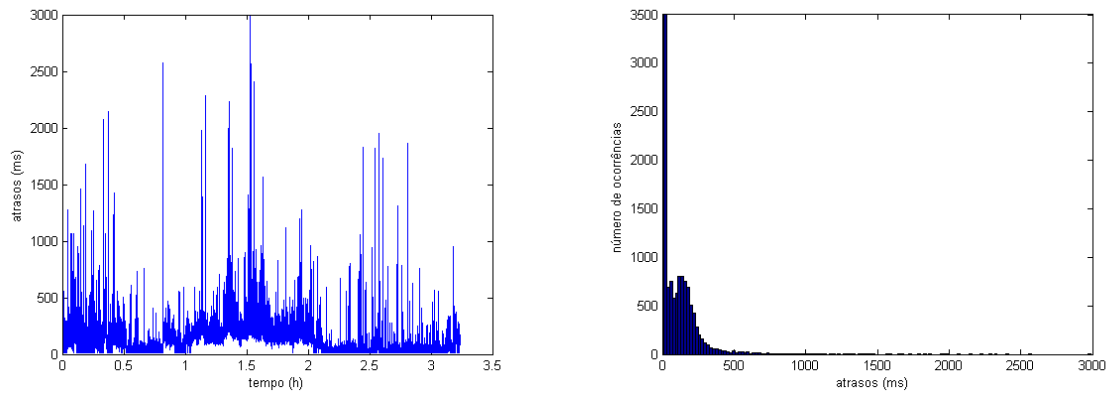


Figura 3.13: Ensaio 10: Atrasos medidos dia 25/07/13 (Início 10:41 horas, $h=1s$).

3.2.2.3 Avaliação da Distribuição dos Atrasos

Pela inspeção visual dos histogramas dos atrasos apresentados, pode-se observar que as distribuições são variantes no tempo e não há uma distribuição única representativa de todos os conjuntos. Em alguns ensaios as distribuições apresentam uma maior semelhança com uma distribuição exponencial, em outros se assemelha com uma mistura de distribuições, por exemplo, gama com gaussiana ou gama com triangular. Para exemplificar, com intuito de fazer uma identificação preliminar da distribuição de probabilidade dos atrasos medidos em uma dada condição operacional, utilizou-se os dados do ensaio 3 (Tabela 3.1) com

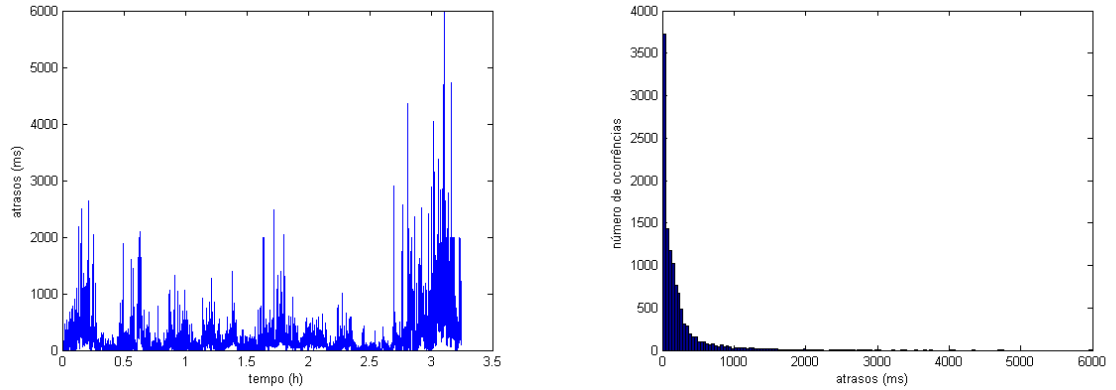


Figura 3.14: Ensaio 11: Atrasos medidos dia 07/08/13 (Início 08:15 horas, $h=1s$).

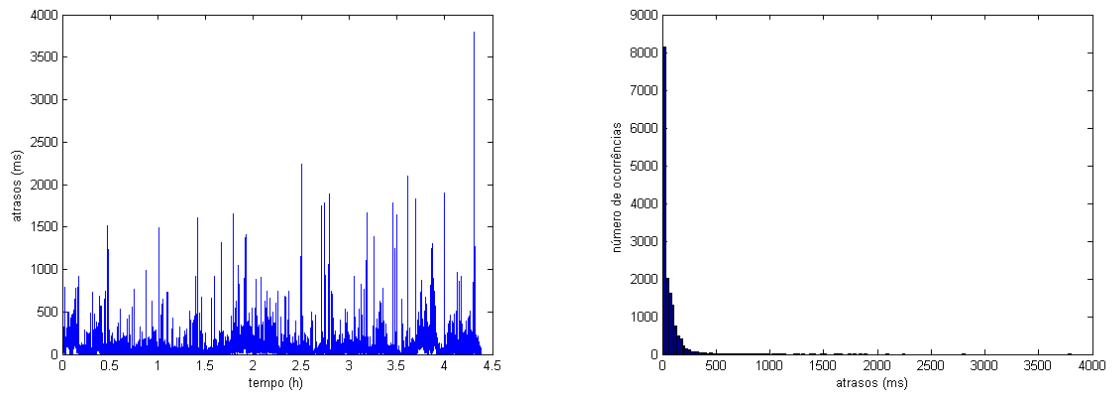


Figura 3.15: Ensaio 12: Atrasos medidos dia 02/08/13 (Início 12:12 horas, $h=1s$).

12.107 amostras.

A série temporal dos atrasos medidos no ensaio 3, com cerca de 16 horas de medição, foi usada para o ajuste de funções com distribuições de poisson, exponencial, gama e gaussiana. Os parâmetros obtidos (usando as funções *poissfit*, *expfit*, *gamfit* e *normfit* do *software* Matlab) foram utilizados (como entradas nas funções *poissrnd*, *expnrnd*, *gamrnd* e *normrnd*) para gerar atrasos aleatórios com as respectivas distribuições. Os gráficos dos atrasos gerados foram traçados superpostos ao gráfico do atraso real na Figura 3.18 e os respectivos histogramas dos atrasos gerados são apresentados na Figura 3.19.

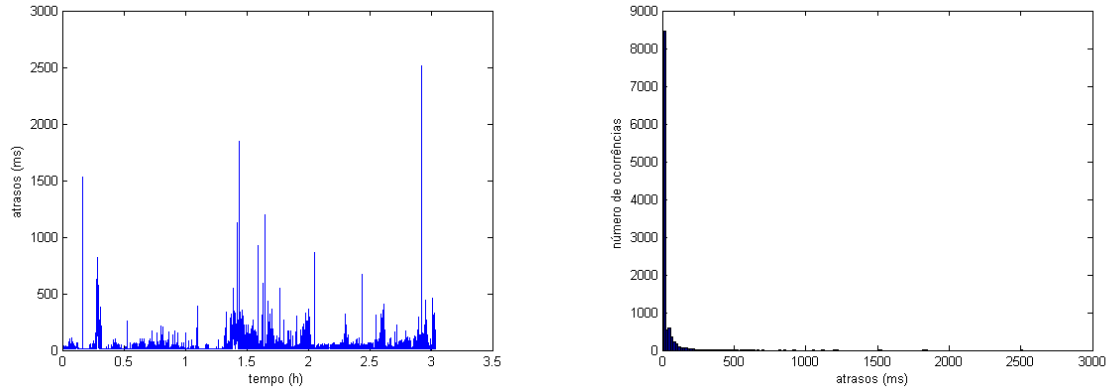


Figura 3.16: Ensaio 13: Atrasos medidos dia 10/08/13 (Início 08:56 horas, $h=1s$).

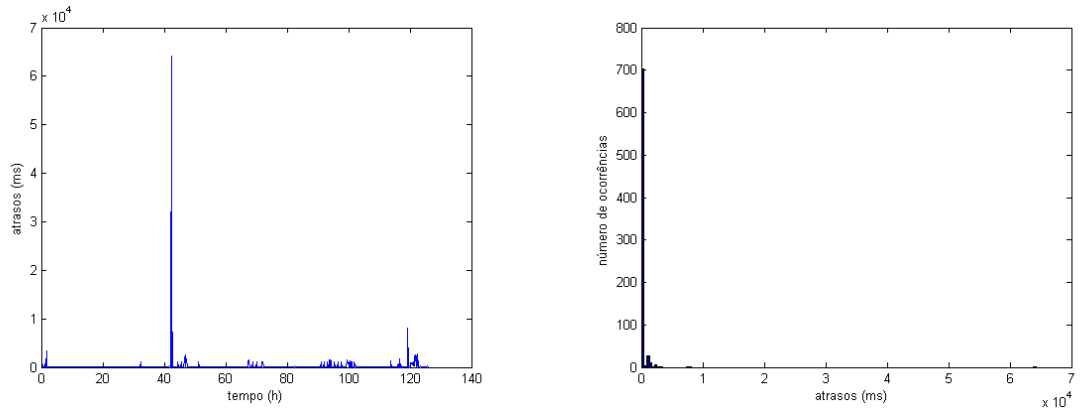


Figura 3.17: Ensaio 14: Atrasos medidos dia 27/09/13 (Início 15:09 horas, $h=600s$).

Na Figura 3.18 constata-se que a distribuição exponencial consegue representar os picos de atrasos de maior amplitude, o que não acontece para as demais distribuições. Entretanto, confirma-se que uma única distribuição não é capaz de representar as variações de atrasos que ocorrem em NCS reais.

3.3 Aspectos Práticos da Implementação de NCSs

Nesta seção são apresentadas algumas questões relativas a implementação prática de NCSs usando a plataforma NCS-CMUF.

Tabela 3.2: Parâmetros Estatísticos de Atrasos Medidos em NCSs reais (S: sequência de ensaios, h: período de amostragem, N: número de amostras, τ_{med} : atraso médio, τ_{min} : atraso mínimo, τ_{max} : atraso máximo, σ : desvio padrão, F: faixa [0-99,7%], D: desvio máximo).

S	h (s)	N	τ_{med} (ms)	M (ms)	τ_{min} (ms)	τ_{max} (ms)	σ (ms)	F	D
8	5	7023	64	28	12	5400	137	[12-474]	39σ
9	5	6539	211	140	8	8860	293	[8-1090]	30σ
10	1	11646	130	100	12	2992	167	[12-630]	17σ
11	1	11699	218	108	8	5996	346	[8-1256]	18σ
12	1	15765	68	32	8	3800	120	[8-427]	31σ
13	1	10943	33	16	8	2516	69	[8-240]	36σ
14	600	756	224	12	8	64248	2393	[8-7403]	27σ

3.3.1 A Plataforma NCS-CMUF

A plataforma NCS-CMUF tem grande flexibilidade para a implementação de estratégias de controle em rede tendo sido preparada para sua aplicação futura na área de geração e consumo distribuídos (*Micro-Grids*) [Lasseter, 2002], [Mariam et al., 2013] e em redes inteligentes (*Smart Grids/Smart Metering*) [Gungor et al., 2013]. A NCS-CMUF foi concebida a partir da plataforma de monitoramento denominada CMUF que é descrita em detalhes em [Jota et al., 2002], [Jota et al., 2005], [Jota et al., 2009], [Batista, 2006] e [Batista et al., 2006]. A plataforma CMUF foi desenvolvida pelo grupo do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI-UFMG) e do Centro de Pesquisa em Energia Inteligente (CPEI-CEFET-MG) e financiada com recursos do FNDCT/CT-ENERG e CEMIG para fins de monitoramento de usos finais [Jota et al., 2002].

A plataforma CMUF adota uma topologia distribuída conforme apresentada na Figura 3.20. Na plataforma CMUF as estações microcontroladas podem exercer as funcionalidades de medição, atuação ou controle de acordo com a programação estabelecida no microcontrolador. As estações são interligadas por uma rede de comunicação dedicada (do tipo CAN). Para conexão à Internet, é utilizado um micro servidor Web (*webserver*). Os dados coletados são enviados (via Internet) para o servidor CMUF, armazenados em um banco de dados e disponibilizados aos usuários cadastrados através de uma página Web. Algumas

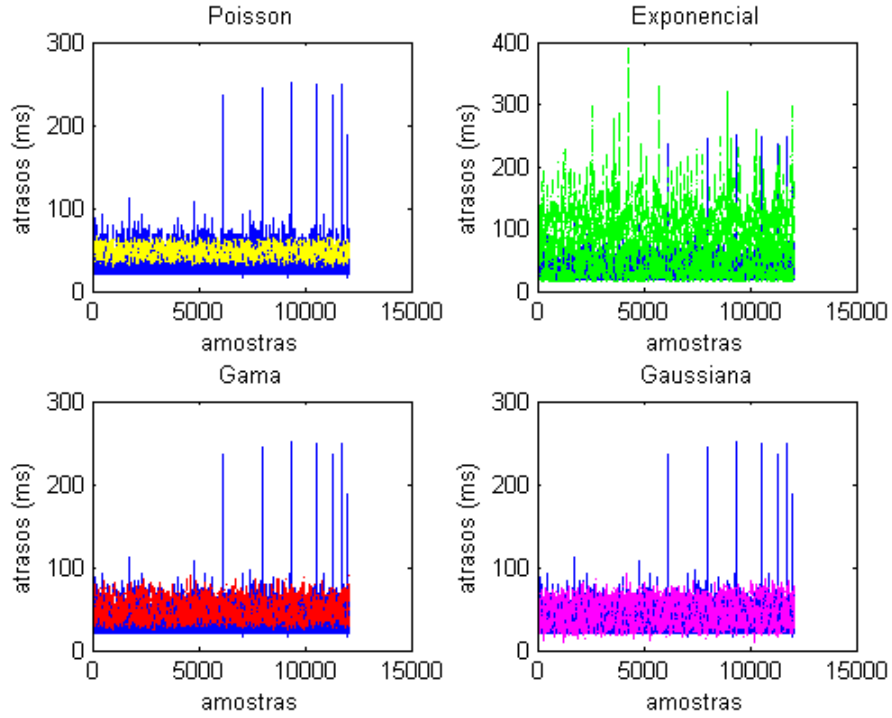


Figura 3.18: Atrasos gerados com distribuições (a) poisson (b) exponencial (c) gama e (d) gaussiana.

aplicações específicas de controle na plataforma CMUF foram desenvolvidas em [Batista, 2006] e [Martins, 2009].

Visando obter uma plataforma com maior flexibilidade para aplicações de controle em rede e *Micro-Grids*, a plataforma CMUF foi reestruturada e a nova plataforma foi denominada NCS-CMUF. A arquitetura da plataforma NCS-CMUF é apresentada na Figura 3.21, na qual foram definidos vários níveis de protocolos. O desenvolvimento da NCS-CMUF envolveu reestruturação dos protocolos e implementação de novos aplicativos em todos os níveis da plataforma CMUF. Durante o presente trabalho, novas funções para esta plataforma foram implementadas, em especial as funções relacionadas aos aplicativos de controle em rede e ao protocolo de comunicação.

Ressalta-se que o projeto CMUF é um trabalho de uma grande equipe do GCPI/UFMG e CPEI/CEFET-MG que vem sendo desenvolvido ao longo dos

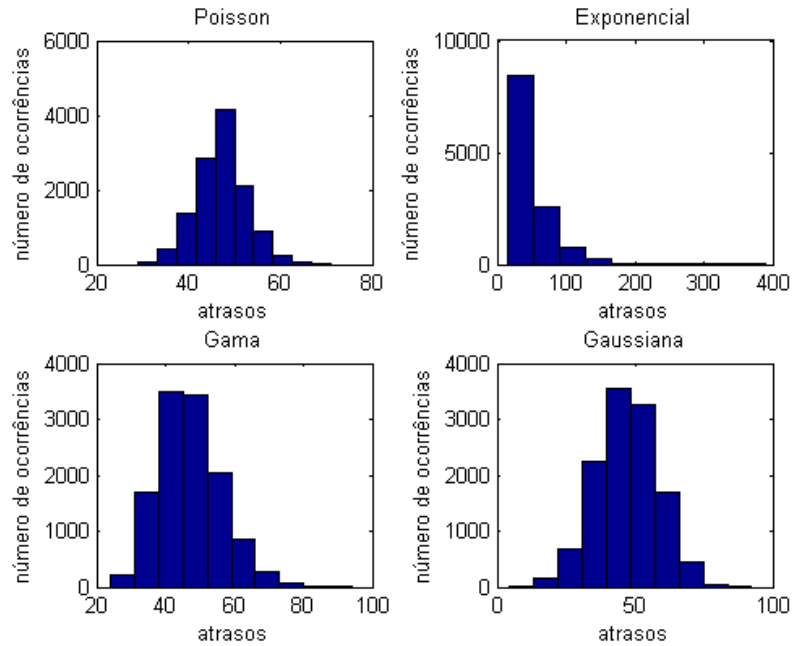


Figura 3.19: Histograma atrasos gerados com distribuições (a) poisson (b) exponencial (c) gama e (d) gaussiana.

últimos anos sob coordenação do orientador do presente trabalho (Prof. Fábio Gonçalves Jota), sendo que as atividades no referido projeto são discutidas e desenvolvidas em equipe, com membros de nível técnico a doutores. A autora do trabalho em questão teve participação no projeto CMUF durante o desenvolvimento do seu mestrado pela UFMG e posteriormente como pesquisadora do CEFET-MG, atuando principalmente na programação das estações microcontroladas, desenvolvendo rotinas de comunicação e de implementação das funcionalidades de medição, atuação e controle nos microcontroladores. Na reestruturação da plataforma NCS-CMUF, a autora atuou principalmente: na definição das estratégias de comunicação; definição de novas funções e procedimentos; definição dos frames de mensagens; no diagnóstico de problemas de comunicação e implementação ocorridos durante a reestruturação; na implementação da sincronização dinâmica dos relógios e de funções específicas do controle em rede e de chaveamento local/remoto; implementação de rotinas para a detecção de repetição e per-

das de pacote através do tratamento do número serial das mensagens e também no aprimoramento de *hardwares* para a plataforma, além dos sensores especificados e condicionados, destaca-se as melhorias realizadas nos sistemas de atuação. Vale destacar também que as rotinas base da plataforma CMUF (sobretudo do *webserver* e servidor CMUF), responsáveis pela comunicação e processamento das mensagens, vem sendo aprimoradas ao longo dos anos por vários membros da equipe, e em particular na nova plataforma NCS-CMUF, estas rotinas foram reestruturadas pelo aluno de iniciação científica Guilherme Oliveira sob supervisão da autora.

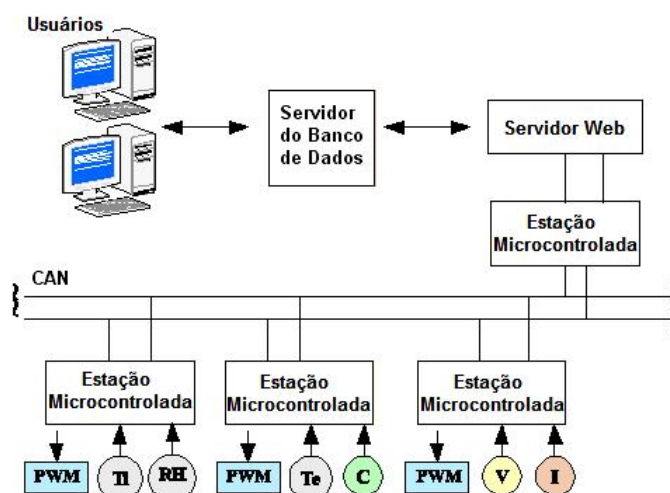


Figura 3.20: Arquitetura da Plataforma CMUF.

Na estrutura atual da NCS-CMUF, optou-se pela utilização do mesmo protocolo nos níveis 3 (entre o webserver e o servidor) e 4 (entre o servidor e o aplicativo de controle remoto), apresentados na Figura 3.21. No protocolo NCS-CMUF as mensagens são classificadas pelo tipo (como função, procedimento, resposta ou dados) e pelo número do identificador (*Request ID*). Para cada *Request ID* temos a definição de um quadro de mensagem específico. Cada mensagem gerada, por cada um dos elementos da rede, tem um número serial específico. O número serial é utilizado para fechar o *handshake* da comunicação. Ao receber uma mensagem a estação receptora (destinatário) envia uma mensagem de reconhecimento (*ack*) com o mesmo número serial da mensagem original para estação remetente. Esta

Níveis de Comunicação na Plataforma NCS - CMUF

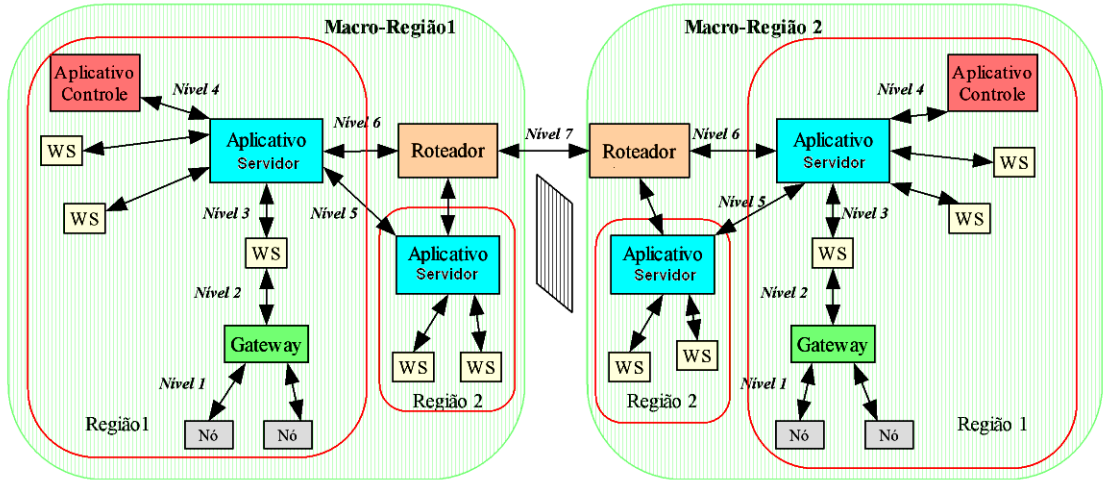


Figura 3.21: Arquitetura da plataforma NCS-CMUF (Nível 1: CAN, Nível 2: RS-232 Níveis 3-7: Internet).

estrutura permite a detecção de eventuais perdas de pacotes através da análise do número serial. Para minimizar a ocorrência de perdas de pacote na NCS-CMUF, as estações têm uma estrutura de reenvio da mensagem com um *buffer* de transmissão baseado em prioridade e uma temporização (*timeouts*) para reenvio. A cada tentativa de reenvio (temporizada por um *timeout*) a prioridade de envio da mensagem no *buffer* de transmissão é reduzida. A tentativa de reenvio é mantida até o recebimento da confirmação ou até o estouro de um *timeout*.

As mensagens na rede têm prioridade estabelecida de acordo com a aplicação: (0) sincronismo, (1) sinal de controle, (2) medida de realimentação para controle e (3) monitoramento. A mensagem de reconhecimento (*ack*) tem a mesma prioridade da mensagem original. Cada mensagem tem uma estampa de tempo (*timestamp*), sendo um bit do *timestamp* correspondente a 4ms, que define a resolução do relógio. A cada segundo o *webserver* envia uma mensagem de sincronismo via *broadcast* para todas as estações locais da rede (inclusive para o *gateway*), de forma a manter os relógios de todas as estações sincronizados com o *webserver*. O sincronismo entre o *webserver* e os demais computadores remotos do sistema é estabelecido via servidor de NTP (*Network Time Protocol*) padrão [NTP, 2013].

Questões relativas ao sincronismo são discutidas mais adiante (subseção 3.3.3).

3.3.2 Controle Remoto na Plataforma NCS-CMUF

Na plataforma NCS-CMUF o NCS pode operar nos modos local (em que a malha de controle é fechada apenas sob a rede CAN) ou remoto (em que a malha de controle é fechada sob as redes CAN, Serial RS-232 e Internet), conforme arquitetura ilustrada na Figura 3.22. A estrutura do controle remoto permite 4 diferentes *links* de rede (CAN, RS-232 e até 2 *links* de Internet). Se for desejado apenas um *link* de Internet os *softwares* do servidor CMUF e do *webserver* podem ser executados em uma mesma máquina configurando o *Link 2* como *localhost*. Essa estrutura foi adotada no presente trabalho.

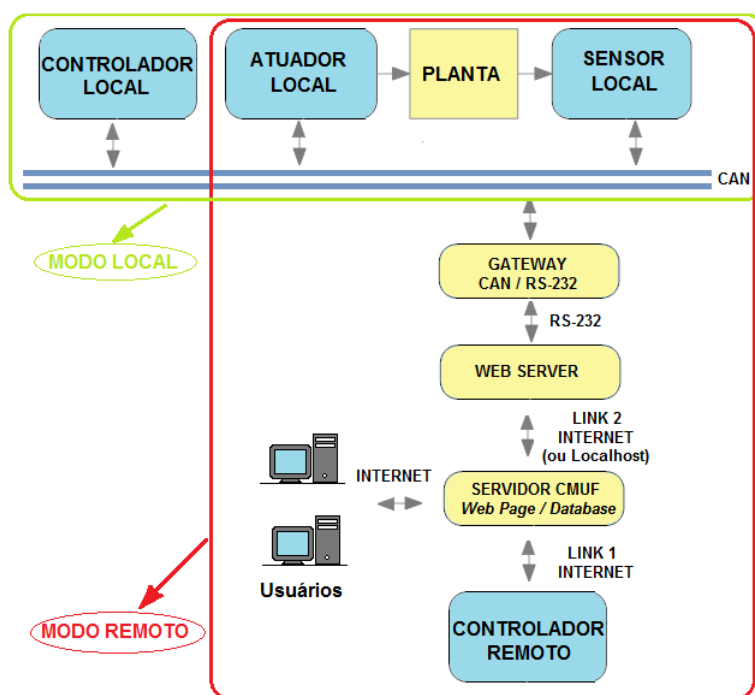


Figura 3.22: Modos de operação local e remoto na plataforma NCS-CMUF.

Vale destacar que, os *softwares* do controlador remoto, servidor CMUF e do *webserver* (vide Figura 3.22) podem ser executados em qualquer computador com *kernel* linux e atualmente os *softwares* do *gateway*, atuador local, sensor local e controlador local (Figura 3.22) são executados em estações microcontroladas utilizando o PIC16F876A.

Os *softwares* do controlador remoto, servidor CMUF e *webserver* foram desenvolvidos com a mesma estrutura, de forma a flexibilizar a implementação de novos aplicativos seja para fins de controle em malha fechada ou gestão energética (monitoramento). O programa é *multi-thread*, e possui 6 *threads*: principal, de conexão, de envio, de recebimento, de *pooling* da serial, de processamento da serial e de controle. A *thread* de controle é responsável pela iniciação dos *links* do controle remoto, cálculo dos atrasos da rede por meio dos *timestamps* das mensagens para eventual compensação e pelo cálculo das ações de controle remota.

Nos ensaios realizados para o desenvolvimento da presente Tese, optou-se por utilizar o modo de operação remoto com o sensor e o atuador locais (fisicamente próximos à planta) e o controlador remoto (distanciado mais de 10km em alguns casos). Como já dito anteriormente, adotou-se a seguinte configuração: controlador remoto e o atuador local disparados por evento (*Event Driven*) e o sensor local disparado por tempo (*Time Driven*). A cada período de amostragem, o sensor local envia uma mensagem com a medida (sinal de realimentação) via redes para o controlador remoto, que processa a ação de controle e encaminha para o atuador. O atuador local (instalado fisicamente junto à planta) ao receber a ação de controle e após aplicá-la à planta, envia uma mensagem de retorno para o controlador remoto com a estampa de tempo do instante da atuação. Como todas as mensagens possuem *timestamps* é possível que uma rotina da *thread* de controle calcule o valor dos atrasos τ_{sc} e τ_{ca} , lembrando que o valor do atraso τ_{ca} só é disponibilizado ao controlador remoto após a aplicação da ação de controle e a chegada da mensagem de reconhecimento, portanto, seu efeito só pode ser computado e eventualmente compensado nas amostragens seguintes.

Uma estrutura preliminar para chaveamento dos modos de operação local e remoto foi implementada e disponibilizada na plataforma NCS-CMUF. Nesta estrutura, mesmo no modo de operação remota, o controlador local continua calculando a ação de controle local em *hot standby* e caso ocorra a desconexão por um tempo superior a um período (*timeout*) configurado no *software* do servidor web

(*webserver*), uma rotina implementada neste *software* gera uma mensagem e a envia via *broadcast* para todas as estações locais indicando a desconexão e imediatamente o controlador local assume o controle e, o sensor local para de enviar a mensagem com sinal de realimentação para o controlador remoto. Quando a conexão é reestabelecida, o controlador remoto antes de reassumir o controle, envia uma mensagem para as estações locais (sensor, controlador e atuador) para inicialização do *link* remoto e passa a solicitar o valor da ação de controle local para efetuar uma comparação antes de realizar o chaveamento. Ao receber a mensagem de inicialização do *link* remoto, sensor local passa a enviar a mensagem com sinal de realimentação para o controlador remoto, que efetua o cálculo da ação de controle remota e compara com o valor da ação de controle local (solicitado a priori). Quando a ação de controle remota atinge um valor compatível com a ação local (com um limite de erro aceitável para cada processo, configurado a priori na rotina do controlador remoto) o controlador remoto envia a mensagem de habilitação do controle remoto para o controlador local (que passa a não enviar a ação de controle para o atuador, mas continua calculando em *hot standby*), concluindo assim o processo de chaveamento para o modo remoto.

Vale destacar que, uma das dificuldades encontradas para a implementação da estrutura de chaveamento foi a limitação de memória de programa (14 Kbytes) do microcontrolador utilizado, dado as diversas funcionalidades (para controle e gestão energética) que foram agregadas as estações microcontroladas da plataforma NCS-CMUF.

Para realização de ensaios com diferentes distribuições de atrasos na plataforma NCS-CMUF, foi criado um *buffer* de atraso no controlador remoto (Figura 3.23) permitindo a inserção de maiores atrasos no *loop* sensor-controlador ou controlador-atuador. Uma rotina implementada no *software* da estação do controlador remoto faz a leitura dos atrasos especificados em um arquivo de texto e aguarda o período determinado em um *sleep* antes de processar a medida do sensor (caso o aumento do atraso desejado seja entre sensor/controlador) ou antes de enviar a mensagem para o atuador (caso o atraso desejado seja entre controlador/atuador). Esta

mesma estrutura de *buffer* também foi implementada na rotina de envio no programa do *webserver*, para possibilitar a inserção de atrasos adicionais no meio do *link* e não diretamente na estação de controle remoto. Independente de qual computador físico o *buffer* de atraso adicional está implementado, a sua função é apenas aumentar os atrasos entre sensor-controlador ou controlador-atuador, se isto for desejado. Esta estrutura do *buffer* de atrasos foi inserida apenas para possibilitar a realização de estudos de NCSs usando a plataforma real. Caso seja desejado manter o atraso da rede real, basta não utilizar a opção do *buffer*.

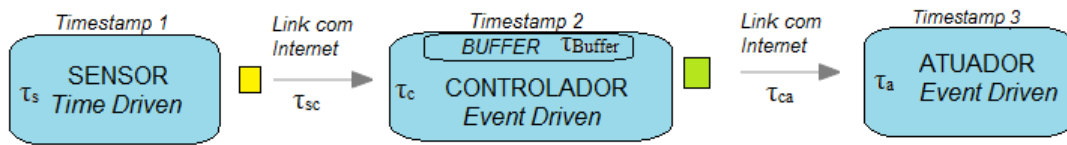


Figura 3.23: Estrutura com *buffer* de atrasos.

Alguns ensaios preliminares para teste do controle remoto na plataforma NCS-CMUF foram realizados em uma planta de primeira ordem (filtro passa-baixas, descrito no Apêndice D) e a plataforma NCS-CMUF mostrou-se adequada para implementação de controle em redes, desempenhando bem o papel para o qual foi proposta.

3.3.3 Questões Relativas ao Sincronismo

Um dos grandes problemas enfrentados para implementação prática de NCS é a sincronização entre os relógios das várias estações (locais e remotas) que compõem o NCS. A sincronização de relógios é um aspecto essencial na infraestrutura de sistemas em rede, entretanto, sincronizar relógios é um problema muito complexo porque o tempo é um alvo móvel, daí a dificuldade de estabelecer uma referência absoluta [Júnior, 2007]. Além disso, observa-se uma necessidade crescente de sincronização com exatidão em escalas de tempo cada vez menores. À medida que os computadores e as redes a eles associados ficam mais rápidos e executam mais tarefas por unidade de tempo, os eventos ocorrem em escalas de tempo cada vez menores, e os registros de estampa de tempo requerem exatidão

e precisão cada vez maiores [Júnior, 2007]. Para controle em malha fechada, quanto mais rápida for a dinâmica do processo maior precisão será requerida na sincronização. A falta de sincronismo resulta em erros nos cálculos dos atrasos efetivos.

Para manter o sincronismo dos relógios entre as estações remotas, diversos protocolos foram propostos, como o *Daytime Protocol*, *Time Protocol*, *ICMP Timestamp Message*, *IP Timestamp Option* e o *Network Time Protocol* (NTP) [Júnior, 2007] e referências internas. O NTP é o protocolo padrão para sincronização de relógios de computadores conectados à Internet. O NTP pode oferecer exatidão da ordem de frações de milisegundos, até dezenas de milisegundos dependendo da qualidade da rede [NTP, 2013]. No NTP, a qualidade da sincronização pode ser avaliada por alguns parâmetros, tais como, *offset* e *jitter*. O *offset* (diferença entre os relógios) é o indicador mais importante da qualidade da sincronização. Quanto menor o *offset*, melhor é a sincronização. Um estudo da caracterização da qualidade da rede de sincronização do NTP é apresentado em [Júnior, 2007].

Na plataforma NCS-CMUF o sincronismo entre os computadores da rede local e remotos (controlador remoto, servidor CMUF e *webserver*) é estabelecido via NTP com prioridade de sincronização estabelecida para o mesmo servidor de NTP. Já entre as estações locais o sincronismo é estabelecido por meio de *reset* remoto dos relógios via mensagens. O *webserver*, como já dito anteriormente, estabelece a sincronização com as estações locais microcontroladas por meio de mensagens de sincronismo disparadas via *broadcast* em intervalos pré-determinados e controladas pelo relógio do *webserver*. As figuras 3.24 e 3.25 ilustram como ocorrem as variações dos atrasos reais τ_{sc} e τ_{ca} medidos na rede remota (LCPI-CPEI). No ensaio da Figura 3.24 destaca-se um erro crescente do relógio devido a perda de sincronismo da rede (serviço NTP desabilitado). Na Figura 3.25 estes efeitos são atenuados após a sincronização (serviço NTP habilitado), demonstrando o *drift* entre os tempos relativos e a necessidade do uso de recursos como o NTP.

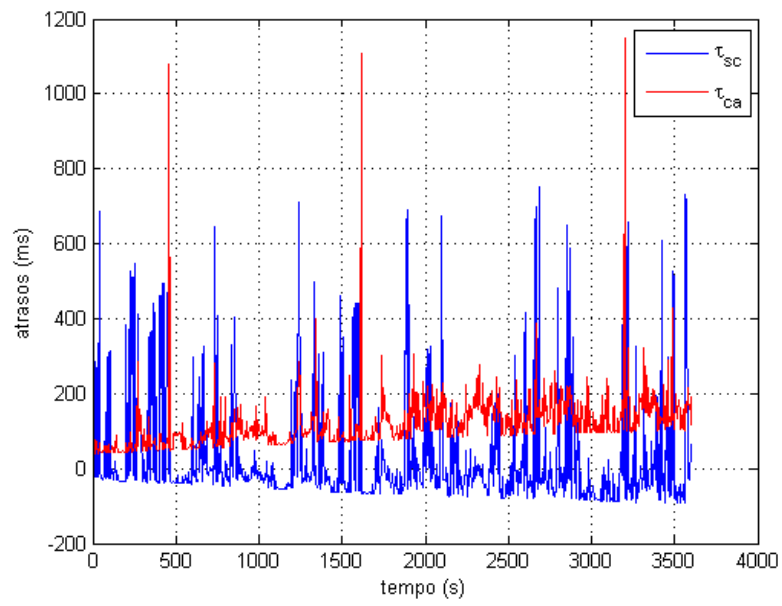


Figura 3.24: Rede sem sincronismo.

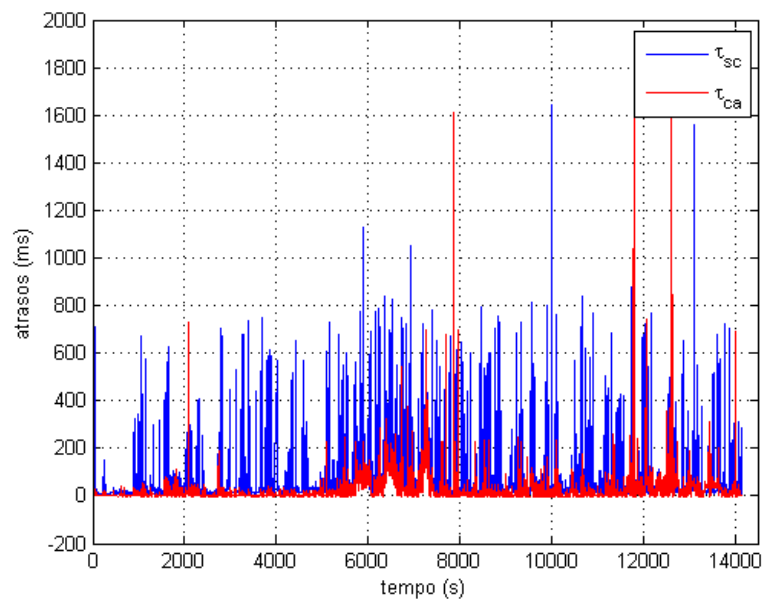


Figura 3.25: Rede sincronizada.

3.3.4 Controladores Padrões da Plataforma NCS-CMUF Utilizados

Os controladores do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo), PI e PI com Preditor de Smith foram agregados como funcionalidades da plataforma NCS-CMUF para controle em malha fechada. A seguir serão detalhados os controladores PI e PI com Preditor de Smith que foram utilizados no presente trabalho para o controle das plantas físicas que serão descritas no Capítulo 4.

3.3.4.1 Controlador PI

A função de transferência do controlador PI (ideal) é dado pela eq. 3.1.

$$Gc(s) = K_c \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (3.1)$$

Para a implementação prática do controlador utilizou-se as equações discretas obtidas por meio da transformação bilinear, como detalhado em [Jota e Pena, 1994]. A estrutura do controlador PI implementado na plataforma NCS-CMUF é apresentada na Figura 3.26, em que $K' = K_c(1 + h/(2T_i))$ e $\beta = (2T_i - h)/(2T_i + h)$, sendo h o período de amostragem.

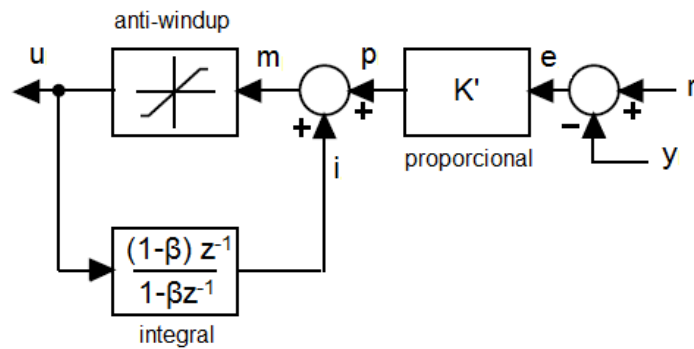


Figura 3.26: Diagrama de blocos do controlador PI discreto com ação *anti-windup*.

O controlador PI disponibilizado na plataforma NCS-CMUF foi implementado com um esquema *anti-windup* a fim de evitar o efeito deletério de saturação da

ação integral. O cálculo do sinal de controle é dado pela eq. 3.2:

$$\begin{aligned}
 e(k) &= r(k) - y(k) \\
 p(k) &= K' e(k) \\
 m(k) &= p(k) + i(k) \\
 u(k) &= m(k) \\
 u(k) &> u_{max} \quad \text{então} \quad u(k) = u_{max} \\
 u(k) &< u_{min} \quad \text{então} \quad u(k) = u_{min} \\
 i(k+1) &= \beta i(k) + (1 - \beta)u(k)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

3.3.4.2 Controlador PI com Preditor de Smith

O Preditor de Smith [Smith, 1957] é uma forma clássica de se compensar o tempo morto, de forma a melhorar o desempenho e a estabilidade do sistema em malha fechada. Para implementação do PI com preditor de Smith na plataforma NCS-CMUF foi adotada a estrutura proposta por Shinskey [Shinskey, 1988], apresentado na Figura 3.27, em que a implementação é mais simples do que a forma tradicional. Este diagrama de blocos proposto por Shinskey apresenta um arranjo simplificado em relação ao diagrama original proposto por Smith [Seborg et al., 1989] que é ilustrado na Figura 3.28.

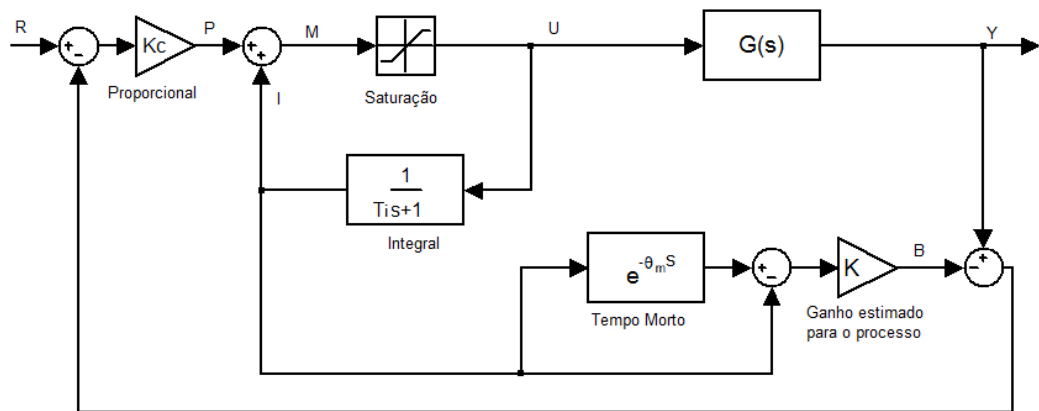


Figura 3.27: Diagrama do controlador PI com Preditor de Smith Simplificado.

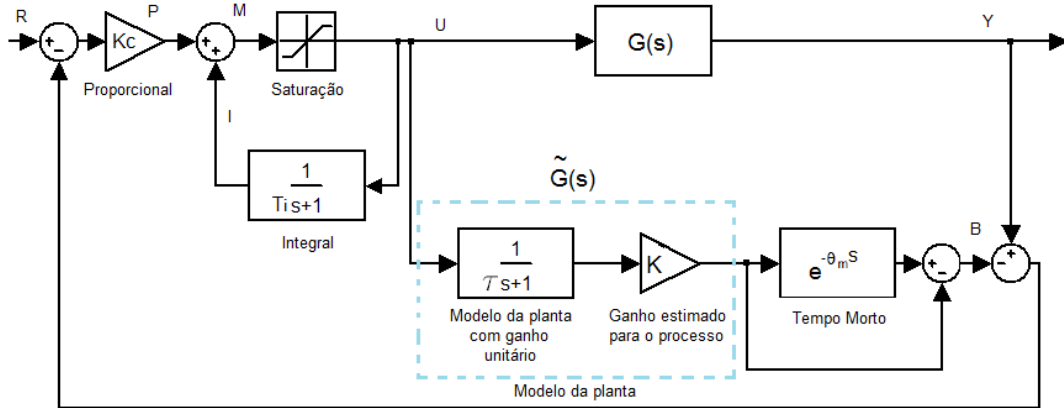


Figura 3.28: Diagrama do controlador PI com Preditor de Smith Original.

Considerando o controlador projetado com os parâmetros de um modelo equivalente de 1ª ordem com $T_i = \tau$, por inspeção visual pode-se verificar a equivalência dos diagramas apresentados nas figuras 3.27 e 3.28. Esta estrutura simplifica a implementação por meio de equações de diferenças uma vez que reduz o número de blocos e conexões [Martins, 2001].

O diagrama do controlador PI discreto com o Preditor de Smith (PI+PS) implementado na plataforma NCS-CMUF é apresentado na Figura 3.29 e também foi utilizado em [Martins, 2001] e [Martins, 2009].

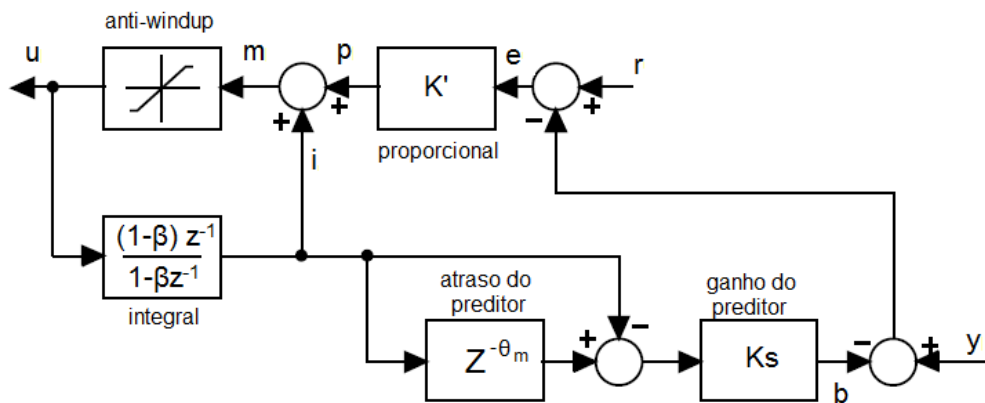


Figura 3.29: Diagrama do controlador PI discreto com Preditor de Smith (PI+PS) e ação *anti-windup*.

O ganho do preditor (K_s) é igual ao ganho estimado para o processo e o atraso do preditor (θ_m) é ajustado em função do tempo da morto da planta e dos atrasos da rede. O controlador também foi implementado com um esquema *anti-windup* e o cálculo do sinal de controle é dado pela eq. 3.3:

$$\begin{aligned}
b(k) &= K_s(i(k - \theta_m(k)) - i(k)) \\
e(k) &= r(k) - y(k) + b(k) \\
p(k) &= K' e(k) \\
m(k) &= p(k) + i(k) \\
u(k) &= m(k) \\
u(k) &> u_{max} \quad \text{então} \quad u(k) = u_{max} \\
u(k) &< u_{min} \quad \text{então} \quad u(k) = u_{min} \\
i(k+1) &= \beta i(k) + (1 - \beta)u(k)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Uma vez que, a plataforma NCS-CMUF possibilita medir com precisão os valores dos atrasos nos *links* (τ_{sc} , τ_{ca} , τ_{sa}) por meio de estampas de tempo, a mesma agrega a vantagem de poder se utilizar o valor do atraso do preditor θ_m de forma adaptativa, em função dos atrasos medidos τ_{sc} , τ_{ca} ou τ_{sa} , como foi utilizado na presente Tese e será detalhado no Capítulo 4.

3.4 Representação e Análise de NCSs

Um dos grandes desafios para análise e projeto de NCSs é a obtenção de modelos que representem realisticamente o sistema real. Como já dito, nesta Tese ênfase é dada na análise dos efeitos dos atrasos variantes no comportamento do sistema em malha fechada. Nesse sentido, questões importantes a serem investigadas são: como a representação adotada lida com a variação destes atrasos; como estes atrasos variantes são numericamente tratados por meio de algoritmos computacionais e qual é o efeito provocado na malha fechada devido às aproximações numéricas usadas nas representações. Visando investigar algumas questões acima mencionadas, no Apêndice A alguns aspectos de representação são analisados. É apresentada uma análise da representação discreta superamostrada e em espaço

de estados aumentada com validação em um NCS real usando a plataforma NCS-CMUF. Aspectos como o efeito de variação da amostragem e da equivalência entre as representações são apresentados. Os efeitos na malha fechada da aproximação no cálculo da exponencial de matrizes usado nas representações também são analisados. Baseado nos resultados do estudo simulado realizado verificou-se que: os modelos discreto superamostrado e em espaço de estado com vetor aumentado representaram satisfatoriamente a planta nas condições analisadas, sendo que, custo computacional devido à super amostragem deve ser avaliado em cada caso; as aproximações no cálculo de exponencial de matrizes usando série de potências truncada apresenta erro bem superior aos métodos de Jordan e Cayley Hamilton e requer um número muito grande de termos para uma aproximação satisfatória.

Outro grande desafio é a determinação das regiões de estabilidade de NCSs reais. Como discutido no Capítulo 2, os métodos determinísticos que utilizam modelos sobreaproximados com incertezas do tipo politópicas e o uso de funções ou funcionais de Lyapunov estão amplamente descritos na literatura para aplicações em NCSs [Heemels et al., 2010] e [Gielen et al., 2008]. Os efeitos dos atrasos variantes na determinação das regiões estabilidade de NCSs usando métodos determinísticos são analisadas no Apêndice B. Alguns resultados foram reproduzidos de artigos da literatura e usados para permitir uma base de comparação entre as ferramentas atuais e a estratégia de análise proposta (que é detalhada no Capítulo 5). Um estudo simulado foi realizado utilizando modelagem politópica baseada no método de *Gridding* com limitante em norma e com atrasos variantes limitados a um período de amostragem. A técnica clássica de análise de estabilidade de um politopo de matrizes a partir de um teste de factibilidade das LMIs descritas nos vértices do domínio de incertezas com o uso da função de Lyapunov quadrática também foi simulada. O estudo simulado revela o conservadorismo dos métodos determinísticos analisados e as limitações para aplicações em NCSs reais.

3.5 Considerações Finais do Capítulo

É imperativo que, na análise e projeto de um NCS real, o comportamento dinâmico e as características estatísticas de atrasos sejam consideradas. No entanto, a dificuldade está em como incorporar os parâmetros estatísticos dos atrasos (bem como, as estruturas de chaveamento e outros sistemas de controle avançado, como, por exemplo, técnicas de compensação adaptativas) nas ferramentas de análise e projeto disponíveis. Neste capítulo mostrou-se que NCSs reais implementados através da Internet estão sujeitos a atrasos com parâmetros estatísticos variantes no tempo e com várias ordens de grandeza de diferença (superiores a 3 ou 4, nos ensaios realizados, conforme apresentado na Tabela 3.2).

As análises das estatísticas dos atrasos apresentadas neste estudo (comparáveis com os apresentados na literatura) mostram que as variações podem ser representadas por diferentes distribuições. Uma única distribuição não é capaz de incorporar nem de forma aproximada todos os fenômenos presentes no sistema real, de uma maneira geral, uma vez que as características dos atrasos podem mudar significativamente de acordo com a hora do dia, o número e a distância entre roteadores, os tipos de rede e outros. Esta observação alerta para a necessidade de se realizarem mais investigações sobre as representações dos atrasos e seus efeitos sobre o projeto do sistema de controle em rede real.

Os testes preliminares na plataforma NCS-CMUF demonstraram a viabilidade da aplicação e a flexibilidade da plataforma para implementação de NCSs.

Capítulo 4

Descrição dos Sistemas Usados e Projeto dos Controladores

Neste capítulo apresentam-se algumas considerações sobre as plantas adotadas, descrevendo os modelos matemáticos e o projeto dos controladores.

Como discutido no Capítulo 2 e Apêndice A, existe uma grande dificuldade em se estabelecer modelos que representem de forma satisfatória e realística todos os fenômenos presentes em NCSs reais e que ao mesmo tempo seja viável para síntese e análise, sobretudo em aplicações reais. Desta forma, procurou-se neste trabalho, representar os NCSs sujeitos a atrasos variantes através de modelos simplificados que fossem adequados para implementação no sistema real e para análise. Optou-se por adotar modelos lineares e validar a sua aplicabilidade com a implementação real. Controladores foram sintetizados baseados nestes modelos lineares e os resultados experimentais são avaliados no Capítulo 6.

4.1 Descrição dos Sistemas Usados

Para a realização dos estudos sobre a influência dos atrasos nas regiões mais prováveis de estabilidade, usando diferentes tipos de controladores em sistemas de controle em rede reais, três plantas físicas que exigem projeto e esquemas de controle diferentes foram utilizadas neste trabalho, a saber: (i) Processo Óptico;

(ii) Processo Térmico de Aquecimento e (iii) Processo Térmico de Resfriamento (Câmara de Refrigeração). As plantas têm características dinâmicas distintas com constantes de tempo que variam de milissegundos a horas, com diferentes restrições de atuação, o que implica que a implementação do controle em rede requer soluções de controle diferenciadas. Além dos desafios de projeto para implementação do controle em rede, a utilização das três plantas tem por objetivo avaliar a influência dos atrasos e o desempenho dos controladores testados em plantas com características dinâmicas e restrições de operação diferentes em condições operacionais distintas, são estas: (i) referência constante; (ii) referência do tipo PRBS; (iii) referência do tipo senoidal; (iv) referência do tipo triangular; (v) variação de carga térmica provocada por meio de abertura de portas e (vi) introdução de ruído adicional na medição, no qual os resultados são apresentados no Capítulo 6.

Na construção dos modelos empíricos, que caracterizam as dinâmicas das plantas para fins de projeto de sistemas de controle, procurou-se empregar estruturas simplificadas de primeira ou segunda ordem. O conjunto de dados usados para a determinação dos modelos empíricos foram obtidos a partir de ensaios de resposta a entradas do tipo degrau e pulso (ciclos liga-desliga na condição operacional). Os tradicionais métodos da resposta complementar [Doebelin, 1990] e de mínimos quadrados foram adotados para a determinação dos parâmetros dos modelos.

4.1.1 Processo Óptico

A primeira planta utilizada foi um forno didático (Figura 4.1) aquecido por uma lâmpada incandescente de 40W. Neste forno foram instalados sensores de temperatura e luminosidade. A malha de luminosidade foi escolhida para ser controlada por apresentar uma resposta dinâmica mais rápida (visto que, do ponto de vista de controle, dinâmicas rápidas são mais difíceis de controlar do que dinâmicas lentas). O sensor de luminosidade foi instalado atrás de um anteparo no interior do forno de forma a ficar totalmente sombreado e evitar incidência direta da irradiação do filamento. O sensor usado é um LDR acoplado com um

divisor resistivo, cuja saída (em volts) é inversamente proporcional à luminosidade no interior do forno. O sinal analógico na faixa de 0 a 5V é medido pela placa sensora da plataforma NCS-CMUF, que possui um conversor analógico/digital. A faixa de medição do sensor está entre 0 e 226 lux.



Figura 4.1: Foto da planta de luminosidade (dimensões do forno 30 x 15 x 9cm).

A atuação na planta é realizada por meio de um dos módulos de acionamento da plataforma NCS-CMUF. O circuito de acionamento utilizado é baseado em triac [Silva, 2009] e possibilita a variação da tensão eficaz entregue à lâmpada. O sinal de acionamento é enviado via uma saída PWM da placa atuadora da plataforma NCS-CMUF. Esse sinal é inversamente proporcional à tensão aplicada à lâmpada. A faixa de atuação está entre 150 bits (que corresponde à tensão máxima de 108.4V, ou seja, 100% da ação de controle) e 800 bits (que corresponde à tensão mínima de 27.7V, ou seja, 0% da ação de controle).

Para modelar a dinâmica de variação da luminosidade adotou-se um modelo de segunda ordem com atraso puro de tempo. O método da resposta complementar foi utilizado para obtenção dos parâmetros do modelo. Foram realizados quatro ensaios de resposta ao degrau na faixa de atuação e obtido um modelo médio. A eq. 4.1 mostra o modelo médio ajustado, utilizado para projeto dos controladores, sendo a constante de tempo dominante igual a 201ms e o ganho igual a 0,63 (bits/bits) que corresponde a 2,6 lux/% da ação de controle.

$$G_L(s) = \frac{\Delta Y_L}{\Delta U_L} = \frac{0,63e^{-0,1s}}{(0,201s + 1)(0,053s + 1)} \quad (4.1)$$

O modelo discreto foi obtido aplicando a Transformada Z à eq. 4.1 considerando o efeito do extrapolador de ordem zero (A/D e D/A) e o intervalo de amostragem de 100 milisegundos (mínimo valor possível do período de amostragem na plataforma utilizada). A saída do modelo discreto (em bits) é dada pela eq. 4.2:

$$\begin{aligned} \Delta y_L(k) &= -a_1 \Delta y_L(k-1) - a_2 \Delta y_L(k-2) + b_1 \Delta u_L(k-1-\theta_p) \\ &+ b_2 \Delta y_L(k-2-\theta_p) \\ y_L(k) &= \Delta y_L(k) + y_0 \\ u_L(k) &= \Delta u_L(k) + u_0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

sendo y_L e u_L a saída e entrada da planta respectivamente, $a_1 = -0,7596$, $a_2 = 0,0922$, $b_1 = 0,1439$, $b_2 = 0,0656$, $y_0 = 126 \text{ bits}$, $u_0 = 0 \text{ bits}$ e $\theta_p = 1$.

A Figura 4.2 ilustra o diagrama de blocos do sistema em malha fechada da malha de luminosidade. Destaca-se que, os cálculos no controlador foram realizados com as variáveis em bits e, a saída (y) do modelo em lux é obtida através da equação de calibração dada pela eq. 4.3.

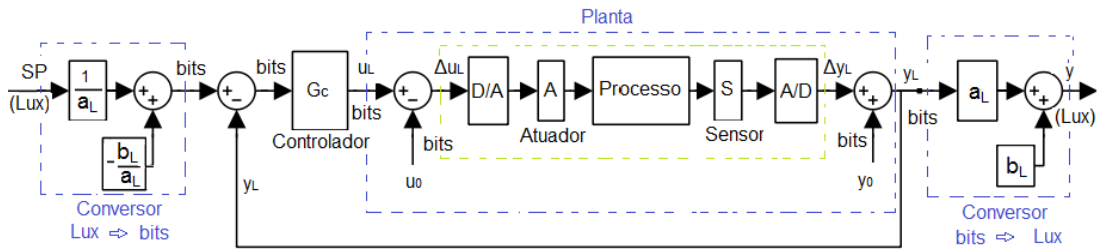


Figura 4.2: Diagrama de blocos: malha de luminosidade.

$$y = a_L y_L + b_L \quad (4.3)$$

sendo $a_L = -0,6647$ (lux/bit) e $b_L = 412,114$.

A Figura 4.3 ilustra a resposta de saída de luminosidade (real e simulada) a um sinal PRBS através do modelo da eq. 4.2, refletindo a validação do modelo em condições reais de operação.

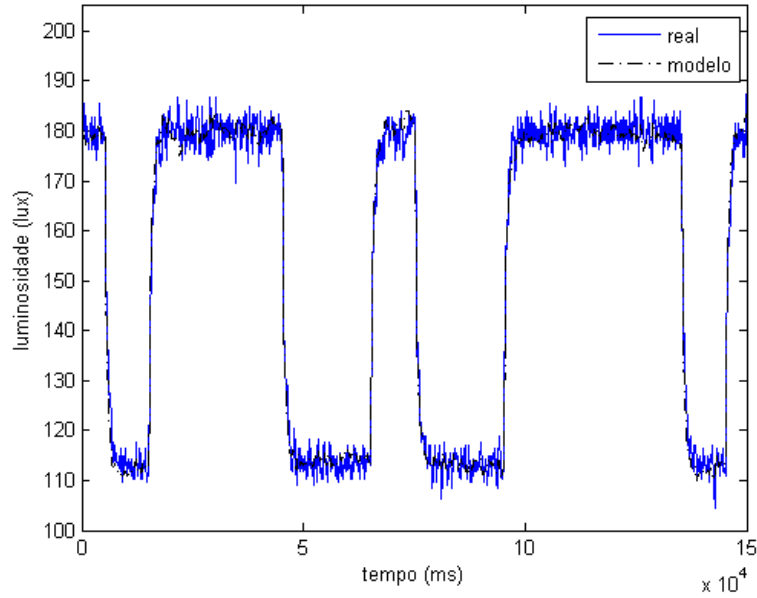


Figura 4.3: Resposta do modelo obtido para malha de luminosidade.

4.1.2 Processo Térmico

A segunda planta utilizada também é um forno didático (Figura 4.4) aquecido com uma lâmpada de 100W. Este forno apresenta uma única malha de temperatura. Foi instalado neste forno um sensor de temperatura (LM35DZ) com circuito de condicionamento (MARS- Módulo de Amplificação e Retificação de Sinais), que gera uma saída de 0 a 5V. Este sinal analógico de 0 a 5V é lido pela placa sensora. A faixa de medição do sensor está entre 0°C e 50°C. A atuação nesta planta também é realizada por meio de circuito de acionamento baseado em triac, cuja faixa de atuação é de 0 bits (100% da ação de controle que corresponde a 124V na lâmpada) a 1000 bits (0% da ação de controle que corresponde a 0V).



Figura 4.4: Foto do forno didático usado para o processo térmico (dimensões do forno 15 x 14 x 8cm).

Para caracterizar a malha de temperatura adotou-se um modelo de segunda ordem sem atraso puro de tempo. Embora a planta apresente comportamento bilinear, ou seja, a dinâmica de aquecimento (forçado) é diferente da dinâmica de resfriamento (natural), optou-se por modelar a dinâmica de aquecimento. É portanto esperado que o modelo apresente um maior erro no resfriamento, mas que seja adequado para fins de projeto de controle. O modelo médio representado pela eq. 4.4 foi obtido por meio de ensaios de resposta ao degrau na faixa de atuação. O método da resposta complementar foi utilizado para obtenção dos parâmetros do modelo. O modelo da eq. 4.4 foi utilizado para projeto dos controladores, sendo o ganho igual a -1,7 (bits/bits) que corresponde a 0,83 °C/% da ação de controle.

$$G_T(s) = \frac{\Delta Y_T}{\Delta U_T} = \frac{-1,7}{(79s + 1)(0,6s + 1)} \quad (4.4)$$

O modelo discreto foi obtido considerando um extrapolador de ordem zero (A/D e D/A) e o período de amostragem de 1 segundo. Este período de amostragem foi escolhido igual a 1/15 da constante de tempo em malha fechada especificada no projeto ($\tau_d=15s$). A saída do modelo discreto (em bits) é dada pela eq. 4.5:

$$\begin{aligned}
\Delta y_T(k) &= -a_1 \Delta y_T(k-1) - a_2 \Delta y_T(k-2) + b_1 \Delta u_T(k-1) \\
&\quad + b_2 \Delta y_T(k-2) \\
y_T(k) &= \Delta y_T(k) + y_0 \\
u_T(k) &= \Delta u_T(k) + u_0
\end{aligned} \tag{4.5}$$

sendo $a_1 = -1,1763$, $a_2 = 0,1875$, $b_1 = -0,0110$, $b_2 = -0,0064$, $y_0 = 484 \text{ bits}$ e $u_0 = 1000 \text{ bits}$.

A Figura 4.5 ilustra o diagrama de blocos do sistema em malha fechada da malha de temperatura. Os cálculos no controlador foram realizados com as variáveis em bits e, a saída (y) do modelo em graus Celsius é obtida através da equação de calibração dada pela eq. 4.6.

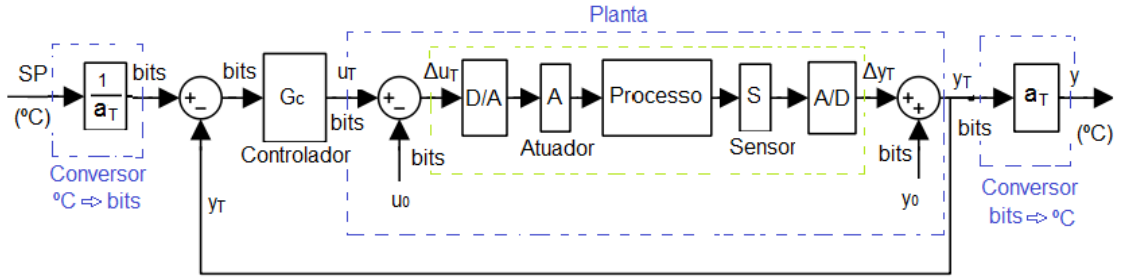


Figura 4.5: Diagrama de blocos: malha de temperatura.

$$y = a_T \ y_T \tag{4.6}$$

sendo $a_T = 0,0488$.

A Figura 4.6 exemplifica a saída de temperatura real e simulada para uma entrada do tipo PRBS através do modelo da eq. 4.5, refletindo um modelo satisfatório para fins de projeto de controle.

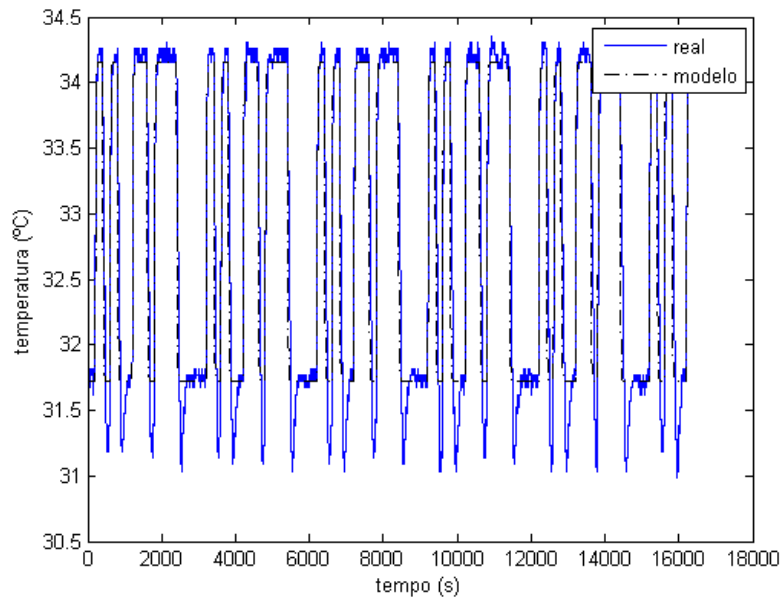


Figura 4.6: Resposta a uma entrada do tipo PRBS do modelo obtido para a malha de temperatura do forno.

4.1.3 Câmara de Refrigeração

A terceira planta utilizada é uma câmara de refrigeração comercial (freezer vertical F-250 da Electrolux, cujas características técnicas estão descritas no Apêndice E) com um módulo NCS-CMUF para monitoramento, controle e atuação (Figura 4.7). O módulo NCS-CMUF foi desenvolvido no projeto CMUF-R para fins de monitoramento e controle das câmaras do Hemocentro de Belo Horizonte (HBH) [Jota et al., 2011],[Jota et al., 2013]. Ele é composto pelas seguintes unidades: sensor; controlador local; atuador local; circuito de acionamento e servidor web. Esta planta está atualmente instalada no CPEI-CEFET/MG e é semelhante a alguns modelos utilizados no HBH para armazenamento de hemo-derivados.

A malha escolhida para controle foi a temperatura interna do freezer, medida na gaveta central do mesmo. Para medição da temperatura interna utilizou-se um sensor do tipo termopar com um circuito de condicionamento composto por um transmissor 4-20mA e um módulo de amplificação (MARS). O sensor mede



Figura 4.7: Foto da câmara de refrigeração e módulo da plataforma NCS-CMUF.

em uma ampla faixa, de -100 a 40°C .

Para atuação também utilizou-se o circuito de acionamento baseado em triac, que possibilita por meio da alteração do ângulo de disparo reduzir a tensão eficaz entregue ao compressor e consequentemente a potência consumida. Entretanto, esta câmara possui algumas restrições físicas que afetam o sistema de controle e devem ser consideradas: i) a capacidade de refrigeração da câmara sofre variação quase desprezível quando opera em tensão reduzida na condição analisada; ii) a câmara possui uma chave de proteção térmica que limita o tempo mínimo de 4 minutos entre um desligamento e um religamento [Paiva, 2013].

Dadas as restrições do processo, decidiu-se por fazer uma atuação Liga-Desliga eficiente, operando com tensão reduzida, para obter um menor consumo energético e reduzir as oscilações de temperatura presentes no controle Liga-Desliga convencional do equipamento. Para tanto, um algoritmo especial foi implementado na unidade atuadora desta planta. Este algoritmo converte o sinal gerado pelo controlador no ciclo de trabalho do equipamento a cada período de amostragem,

ou seja, no percentual do período de amostragem em que o equipamento permanece ligado. Esta estratégia foi denominada de Estratégia de Controle Modulado com Restrição, uma vez que, a unidade atuadora modula o ciclo de trabalho do equipamento baseado no sinal de controle gerado pelo controlador e utiliza uma estratégia para minimizar os efeitos da restrição, que limita o tempo mínimo de 4 minutos entre um desligamento e um religamento, como será descrito na subseção 4.2.2.3. Este algoritmo especial da unidade atuadora foi implementado por Paiva em [Paiva, 2013] e será melhor detalhado na subseção 4.2.2.3.

Para a malha de temperatura da câmara adotou-se um modelo de primeira ordem com atraso puro de tempo dado pela eq. 4.7. Para obtenção do modelo foi realizado um ensaio aplicando pulsos, ou seja, ciclos liga-desliga a cada 5 minutos. Este ensaio foi realizado com o objetivo de obter um modelo que representasse adequadamente o comportamento da planta na condição operacional, uma vez que a mesma opera em ciclos liga-desliga. Como no modo de operação liga-desliga a resposta do sistema (aos pulsos aplicados) não estabiliza (vide Figura 4.9), não é possível se aplicar o método da resposta complementar para obtenção do modelo no tempo contínuo. Portanto, o método dos mínimos quadrados foi utilizado para obtenção dos parâmetros de um modelo discreto preliminar com os dados coletados a cada 10 segundos, a partir dos parâmetros deste modelo discreto ajustou-se os parâmetros do modelo contínuo dado pela eq. 4.7.

$$G_R(s) = \frac{\Delta Y_R}{\Delta U_R} = \frac{0.0435e^{-180s}}{(18000s + 1)} \quad (4.7)$$

Um modelo discreto considerando um extrapolador de ordem zero (A/D e D/A) e o período de amostragem de 10 minutos foi obtido a partir do modelo contínuo da eq. 4.7. A saída do modelo discreto (em bits) é dada pela eq. 4.8.

$$\begin{aligned} \Delta y_R(k) &= -a_1 \Delta y_R(k-1) + b_1 \Delta u_R(k-1 - \theta_p) \\ y_R(k) &= y_0 - \Delta y_R(k) \\ u_R(k) &= \Delta u_R(k) + u_0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

sendo $a_1 = -0,9672$, $b_1 = 0,0014$, $y_0 = 703 \text{ bits}$, $u_0 = 0 \text{ bits}$ e $\theta_p = 180s$.

A Figura 4.8 ilustra o diagrama de blocos do sistema em malha fechada da malha de temperatura da câmara de refrigeração. Os cálculos no controlador foram realizados com as variáveis em bits e convertidos em ciclo de trabalho do equipamento por meio de um atuador especial (que será detalhado na subseção 4.2.2.3). A saída (y) do modelo em graus Celsius é obtida através da equação de calibração dada pela eq. 4.9.

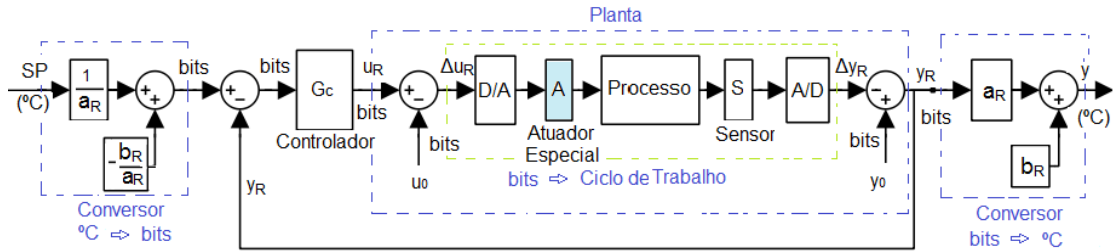


Figura 4.8: Diagrama de blocos: malha de temperatura da câmara de refrigeração.

$$y = a_R y_R + b_R \quad (4.9)$$

sendo $a_R = 0,17$ e $b_R = -135$.

A Figura 4.9 mostra a saída de temperatura real e simulada através do modelo da eq. 4.8, refletindo um modelo adequado para caracterizar a condição operacional (após a estabilização).

4.2 Projeto dos Controladores

Nesta seção são descritos os projetos dos diferentes controladores utilizados, nos estudos de casos, para análise do comportamento dos sistemas de controle em rede sujeitos a atrasos variantes. Todos os controladores foram implementados com ação *anti-windup*. Foram projetados controladores do tipo: Proporcional e Integral (PI); PI com Preditor de Smith Adaptativo (aqui denominado de PI+PS); PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle (PI+CE) e PI com Preditor de Smith Adaptativo e Compensação Explícita do Sinal de Controle

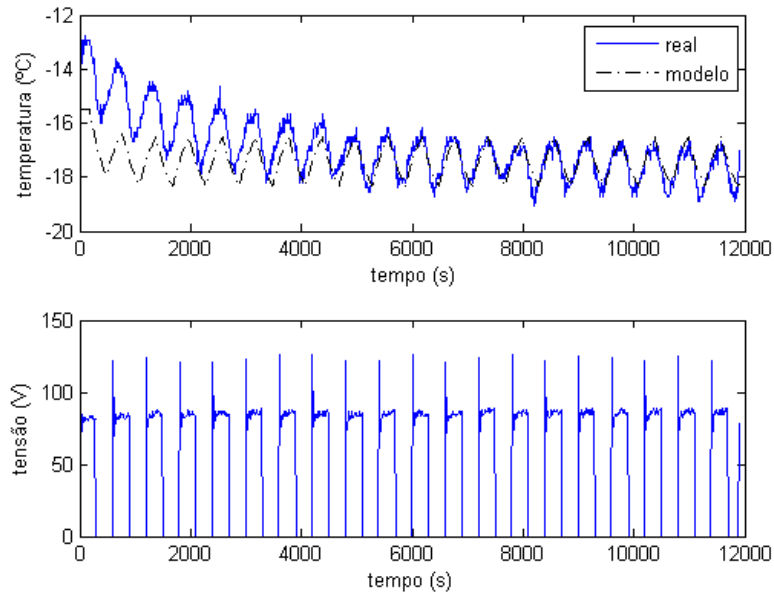


Figura 4.9: Resposta do modelo obtido para malha de temperatura da câmara de refrigeração.

(PI+PS+CE).

4.2.1 Descrição dos Controladores

4.2.1.1 Controlador PI

O controlador do tipo PI com ação *anti-windup* disponibilizado na plataforma NCS-CMUF (descrito no Capítulo 3) foi adotado para controle em malha fechada das plantas físicas descritas na seção anterior.

O Método da Síntese Direta [Seborg et al., 1989] foi adotado para o projeto. A aplicação deste método consiste no projeto de controladores a partir do modelo matemático do processo e uma especificação da resposta em malha fechada desejada. Vale destacar que este método requer que o projetista especifique uma resposta desejada para a malha fechada. A aplicação do Método da Síntese Direta a plantas modeladas como de segunda ordem mais tempo morto resulta em um controlador do tipo PID com $K_c = (\tau_1 + \tau_2)/(K(\tau_d + \theta_p))$, $T_i = \tau_1 + \tau_2$ e

$T_d = (\tau_1 \tau_2) / (\tau_1 + \tau_2)$; em plantas modeladas como de primeira ordem mais tempo morto obtém-se um controlador do tipo PI com $K_c = \tau_{ma} / (K(\tau_d + \theta_p))$ e $T_i = \tau_{ma}$. Sendo K_c o ganho do controlador, T_i o tempo integral, T_d o tempo derivativo, K o ganho da planta, τ_1, τ_2 e τ_{ma} as constantes de tempo da planta, θ_p o tempo morto e τ_d a constante de tempo desejada de malha fechada [Seborg et al., 1989]. Embora a aplicação do método da síntese direta em uma planta de segunda ordem resulte em um controlador do tipo PID, nos projetos em questão (Processos Óptico e Térmico que foram modelados como plantas de segunda ordem), considerou-se $T_d = 0$, uma vez que o valor de T_d de projeto não atende uma restrição de implementação do controlador discreto. Para implementação prática do controlador digital utilizou-se a transformação bilinear e, na equação discreta do controlador aparece o termo T_d/h (sendo h o período de amostragem), existe um valor mínimo realizável de T_d/h para que o sistema discreto não se torne instável ($T_d/h > 5$, para transformação bilinear) [Jota e Pena, 1994]. Caso o valor de projeto obtido para T_d não atenda esta restrição ($T_d/h > 5$) utiliza-se $T_d = 0$, ou seja, um controlador do tipo PI [Jota e Pena, 1994], como foi adotado nesta Tese. No projeto da malha de luminosidade obteve-se $T_d = 41,9\text{ms}$, sendo o valor mínimo igual a 500ms (com $h=100\text{ms}$) e para a malha de temperatura obteve-se $T_d = 0,6\text{s}$, sendo o valor mínimo igual a 5s (com $h=1\text{s}$).

4.2.1.2 Controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo

O controlador PI com o Preditor de Smith (PI+PS) [Smith, 1957] disponibilizado pela plataforma NCS-CMUF (Figura 3.29) foi adotado com o objetivo de minimizar os efeitos dos atrasos na malha fechada. No projeto, a obtenção do ganho do controlador PI com o uso do Preditor de Smith deve ser realizada retirando o tempo morto da planta, logo para o projeto pelo método da síntese direta com PI+PS adota-se $K_c = (\tau_1 + \tau_2) / (K\tau_d)$ para plantas modeladas como de segunda ordem e $K_c = \tau_{ma} / (K\tau_d)$ para plantas modeladas como de primeira ordem [Seborg et al., 1989]. Como o controlador PI+PS disponibilizado pela plataforma NCS-CMUF adota um diagrama simplificado aplicado à plantas de primeira or-

dem, para o projeto do PI+PS para as plantas modeladas como segunda ordem adotou-se uma aproximação de primeira ordem com $\tau_{ma} = \tau_1 + \tau_2$; sabendo que isto resulta em algum erro devido a não consideração do modelo exato, mas que deverá ser contornado pelo controle em malha fechada assim como demais dinâmicas não modeladas, lembrando que o modelo é uma representação aproximada do sistema físico real.

Como já dito, a plataforma NCS-CMUF possibilita utilizar o valor do atraso do preditor θ_m de forma adaptativa, em função dos atrasos medidos na rede τ_{sc} , τ_{ca} ou τ_{sa} . Os atrasos na rede (τ_{sc} , τ_{ca} e $\tau_{sa} = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} + \tau_a$) são calculados por meio das estampas de tempo das mensagens, como descrito no Capítulo 3. Neste trabalho o atraso do preditor θ_m foi considerado em função do atraso médio da rede. Um filtro de média móvel com janela temporal de 10 amostras foi adotado para obtenção do atrasos médios da rede ($\bar{\tau}_{sc}$, $\bar{\tau}_{ca}$ e $\bar{\tau}_{sa}$) dado pela eq. 4.10:

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_{sc}(k) &= 0.9 \bar{\tau}_{sc}(k-1) + 0.1 \tau_{sc}(k) \\ \bar{\tau}_{ca}(k) &= 0.9 \bar{\tau}_{ca}(k-1) + 0.1 \tau_{ca}(k) \\ \bar{\tau}_{sa}(k) &= 0.9 \bar{\tau}_{sa}(k-1) + 0.1 \tau_{sa}(k)\end{aligned}\tag{4.10}$$

o atraso do preditor $\theta_m(k)$ a cada período de amostragem é calculado pela eq. 4.11:

$$\theta_m(k) = \theta_p + \bar{\tau}_{rede}(k)\tag{4.11}$$

sendo θ_p o tempo morto da planta e $\bar{\tau}_{rede}(k)$ considerado igual a $\bar{\tau}_{sc}(k)$ ou $\bar{\tau}_{ca}(k-1)$ ou $\bar{\tau}_{sa}(k-1)$ dependendo do ensaio analisado.

Vale destacar que no presente trabalho os atrasos são efetivamente medidos em tempo real por meio das estampas de tempo e posteriormente filtrados para utilização no Preditor de Smith, diferentemente de outros trabalhos publicados na literatura que também utilizam Preditores de Smith; como por exemplo, em [Lai e Hsu, 2010] e [Lai et al., 2008] em que atraso do preditor é estimado com base no RTT (*Round Trip Time*) e em [Du e Du, 2009] e [Du et al., 2009] nos quais os atrasos também não são efetivamente medidos.

4.2.1.3 Controlador PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle

A estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle (CE) para NCSs, foi proposta por Martins e Jota [Martins, 2009], [Martins e Jota, 2009]. O diagrama do controlador PI com o uso da estratégia de compensação explícita do sinal de controle, adaptada para aplicação com controlador *event-driven*, é apresentado na Figura 4.10. O sistema de controle com compensação explícita do sinal de controle faz uso de um estimador para valores de saída da planta e um compensador para a ação de controle, que tem por objetivo calcular a ação de controle efetivamente aplicada ao sistema, em cada intervalo de amostragem, baseado no modelo da planta, para que possa ser feita uma correção adicional no sinal de controle a ser aplicado [Martins, 2009].

O controlador PI+CE foi implementado com um esquema *anti-windup* e o cálculo do sinal de controle é dado pela eq. 4.13:

$$\begin{aligned}
e(k) &= r(k) - y(k) \\
p(k) &= K' e(k) \\
m(k) &= p(k) + i(k) \\
\hat{u}(k) &= m(k) \\
\hat{u}(k) &> u_{max} \quad \text{então} \quad \hat{u}(k) = u_{max} \\
\hat{u}(k) &< u_{min} \quad \text{então} \quad \hat{u}(k) = u_{min} \\
i(k+1) &= \beta i(k) + (1 - \beta) \hat{u}(k) \\
\hat{u}_c(k) &= \hat{u}(k) + ACCud \\
u(k) &= \hat{u}_c(k) \\
u(k) &> u_{max} \quad \text{então} \quad u(k) = u_{max} \\
u(k) &< u_{min} \quad \text{então} \quad u(k) = u_{min}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

sendo $ACCud$ o déficit do sinal de controle acumulado.

O déficit do sinal de controle acumulado é calculado baseado na estrutura de compensação explícita, composta essencialmente por um estimador, um compensador e um filtro. O estimador de saída da planta é baseado no modelo

autoregressivo de diferenças com entrada exógena, dado pela eq. 4.13:

$$\begin{aligned}\Delta\hat{y}(k) &= -a_1\Delta y(k-1) - a_2\Delta y(k-2) - \dots - a_{na}\Delta y(k-na) + b_1\Delta u(k-1) \\ &+ b_2\Delta u(k-2) + \dots + b_{nb}\Delta u(k-nb) \\ \hat{y}(k) &= \Delta\hat{y}(k) + y_0\end{aligned}\tag{4.13}$$

sendo $a_1, \dots, a_{na}, b_1, \dots, b_{nb}$ e y_0 os parâmetros do modelo da planta. O compensador de sinal de controle é dado pela eq. 4.14:

$$\begin{aligned}\Delta\bar{u}(k-1) &= (\Delta\hat{y}(k) + a_1\Delta\hat{y}(k-1) + a_2\Delta\hat{y}(k-2) + \dots a_{na}\Delta\hat{y}(k-na) \\ &- b_2\Delta\bar{u}(k-2) - \dots - b_{nb}\Delta\bar{u}(k-nb))/b_1 \\ \bar{u}(k-1) &= \Delta\bar{u}(k-1) + u_0\end{aligned}\tag{4.14}$$

sendo $a_1, \dots, a_{na}, b_1, \dots, b_{nb}$ e u_0 parâmetros obtidos para o modelo da planta. O déficit do sinal de controle (ud) é dado pela eq. 4.15:

$$ud(k-1) = \hat{u}(k-1) - \bar{u}(k-1)\tag{4.15}$$

o déficit do sinal de controle acumulado ($ACCud$) é dado pela eq. 4.16:

$$ACCud = \sum_{j=0}^{nm-1} \gamma ACCud + K_f(1-\gamma)ud(k-j-1)\tag{4.16}$$

sendo K_f o ganho do filtro, γ a constante de tempo do filtro e nm igual ao número de mensagens que chegam ao controlador dentro do intervalo de amostragem considerado. Como no presente trabalho o controlador é baseado em eventos, chega-se uma única mensagem a cada cálculo do sinal de controle, portanto, adotou-se $nm = 1$, neste caso o acumulador irá funcionar como um filtro de primeira ordem. Nos ensaios apresentados, o ganho K_f foi considerado unitário e a constante de tempo do filtro foi considerada igual a $\gamma = 0$ (sem filtro, ou seja, o valor acumulado $ACCud$ é igual ao próprio $ud(k-1)$), $\gamma = 0.9$ (filtro com janela temporal de 10 amostras) e $\gamma = 0.95$ (filtro com janela temporal de 20 amostras),

4.2.1.4 Controlador PI com Preditor de Smith e Compensação Explícita do Sinal de Controle

4.2.2 Ajuste dos Parâmetros dos Controladores

84



Para malha de Luminosidade adotou-se a constante de tempo de malha fechada desejada igual a da malha aberta, ou seja, $\tau_d = \tau_1 + \tau_2 = 254\text{ms}$. Para esta malha foram implementados 4 tipos de controladores: PI, PI+PS, PI+CE e PI+PS+CE. Os valores utilizados para sintonia dos controladores estão listados na Tabela 4.1.

Controlador	Parâmetro	Valor
Todos	h (período de amostragem)	$h=100\text{ms}$
Todos	T_i (tempo integral)	$T_i=254\text{ms}$
Todos	β (tempo integral em z)	$\beta=0.67$
PI e PI+CE	K_c (ganho proporcional)	$K_c=1.14$
PI e PI+CE	K' (ganho proporcional em z)	$K'=1.36$
PI+PS e PI+PS+CE	K_c (ganho proporcional)	$K_c=1.59$
PI+PS e PI+PS+CE	K' (ganho proporcional em z)	$K'=1.90$
PI+PS e PI+PS+CE	θ_m (atraso do preditor)	adaptativo
PI+CE e PI+PS+CE	γ (constante do filtro $F(z^{-1})$)	$\gamma= 0, 0.9 \text{ e } 0.95$

Para malha de Temperatura do Forno adotou-se a constante de tempo de malha fechada desejada igual $\tau_d = 15s$ a fim de se obter uma resposta mais

rápida em malha fechada. Para esta malha também foram implementados 4 tipos de controladores: PI, PI+PS, PI+CE e PI+PS+CE. Os valores utilizados para sintonia dos controladores estão listados na Tabela 4.2. Ressalta-se que, como o modelo adotado não apresenta tempo morto, os ganhos proporcionais dos controladores, com e sem o PS, são os mesmos.

Tabela 4.2: Parâmetros dos Controladores para Malha de Temperatura

Controlador	Parâmetro	Valor
Todos	h (período de amostragem)	$h=1s$
Todos	T_i (tempo integral)	$T_i=79.6s$
Todos	β (tempo integral em z)	$\beta= 0.9875$
Todos	K_c (ganho proporcional)	$K_c= -3.12$
Todos	K' (ganho proporcional em z)	$K'= -3.14$
PI+PS e PI+PS+CE	θ_m (atraso do preditor)	adaptativo
PI+CE e PI+PS+CE	γ (constante do filtro $F(z^{-1})$)	$\gamma= 0, 0.9$ e 0.95

4.2.2.3 Malha de Temperatura da Câmara de Refrigeração

Devido às restrições físicas do processo (discutidas na subseção 4.1.3), para malha de Temperatura da Câmara de Refrigeração, adotou-se a Estratégia de Controle Modulado com Restrição acoplada com um controlador PI. Para o projeto adotou-se a constante de tempo de malha fechada desejada igual a da malha aberta ($\tau_d = \tau_{ma}=18000s$). Os valores utilizados para sintonia do controlador PI estão listados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros do Controlador PI: Malha de Temperatura da Câmara

Parâmetro	Valor
h (período de amostragem)	$h=600s$
T_i (tempo integral)	$T_i=18000s$
β (tempo integral em z)	$\beta=0.9672$
K_c (ganho proporcional)	$K_c= 22.757$
K' (ganho proporcional em z)	$K'= 23.136$

Como já dito anteriormente, nesta estratégia o sinal de controle gerado pelo controlador PI a cada período de amostragem é convertido, na unidade atuadora, no ciclo de trabalho do equipamento que irá operar com tensão reduzida, cujo

ciclo Ligado é proporcional ao valor do sinal de controle gerado. A resolução do ciclo de trabalho é de 20 segundos, ou seja, o período de amostragem de 10 minutos é dividido em 30 partes de 20 segundos (Figura 4.12). Ao receber o sinal de controle, o atuador faz uma normalização convertendo-o em um sinal de 0 a 30, o valor obtido é então truncado para o menor inteiro. Este valor (inteiro entre 0 e 30) corresponde ao número de intervalos de 20s que a câmara deverá permanecer ligada (com tensão reduzida), sendo aqui denominado de n_{ic} . Devido à restrição de 4 minutos entre um desligamento e um religamento consecutivos imposta pela proteção térmica, o número de intervalos efetivamente aplicados n_{ia} (ligados) a cada período de amostragem só pode assumir valores entre 0 e 18 (0 a 6 minutos) ou 30 (10 minutos), ou seja, uma vez desligada a câmara só poderá ser religada após 4 minutos. A diferença entre o número de intervalos calculados (n_{ic}) e o efetivamente aplicado (n_{ia}) é armazenada como déficit ou crédito em uma variável denominada Banco. Para valores calculados de n_{ic} entre 18 e 24, o atuador aplica o sinal 18 (6 minutos) e armazena a diferença como um valor positivo no Banco (crédito). Para valores calculados de n_{ic} entre 25 e 30, o atuador aplica o sinal 30 (10 minutos) e subtrai o valor restante do Banco (déficit). O valor armazenado no Banco é incluído, quando possível, no n_{ia} a ser aplicado no ciclo seguinte [Paiva, 2013]. Esta estratégia permite obter uma redução expressiva nas oscilações de temperatura da câmara e no consumo energético se comparado com controle Liga-Desliga convencional do equipamento, como serão apresentados nos resultados do Capítulo 6.

4.3 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, os modelos dinâmicos para caracterização das plantas físicas foram obtidos. Os modelos simplificados adotados são capazes de representar as características dinâmicas dominantes dos processos nas condições operacionais analisadas e portanto, os mesmos serão utilizados para fins de projeto de controle. Baseados nos modelos obtidos, controladores do tipo PI e PI acoplados com

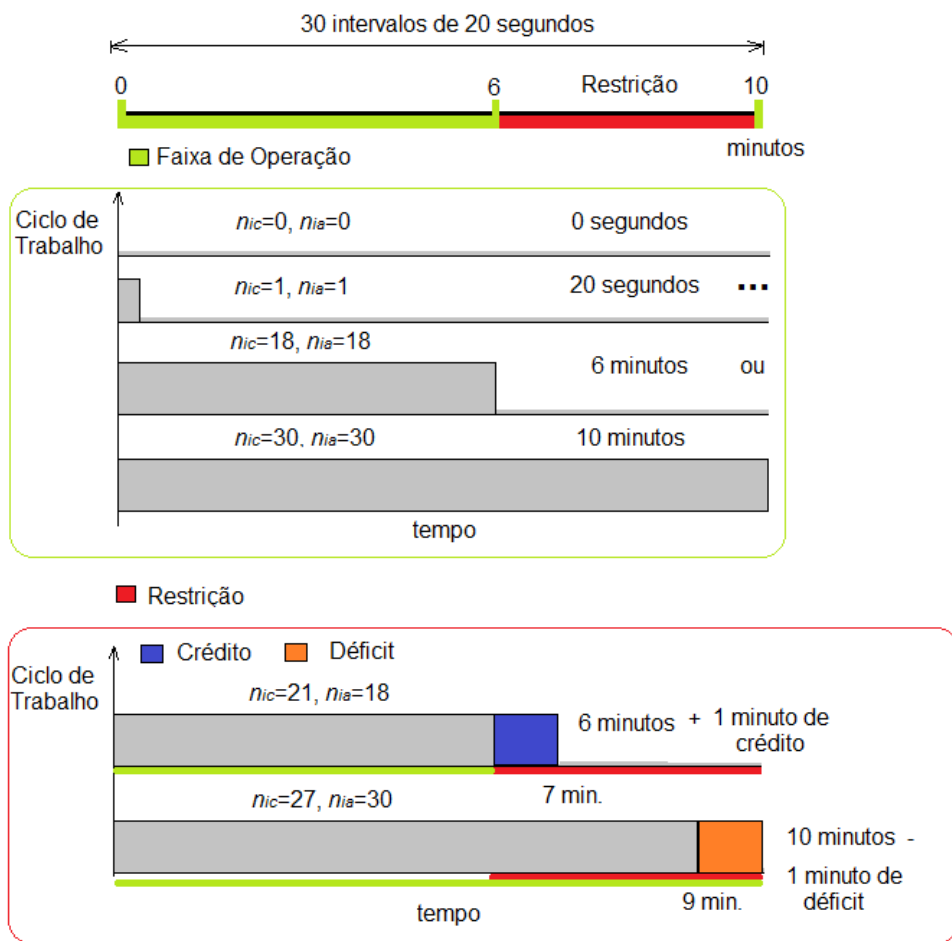


Figura 4.12: Ciclo de trabalho e efeito da restrição.

Preditor de Smith Adaptativo e com Compensação Explícita do Sinal de Controle foram sintetizados. A verificação da aplicabilidade de tais modelos e projetos em NCSs são realizadas em implementações reais detalhadas no Capítulo 6.

Capítulo 5

Análise de NCSs: Efeitos dos Atrasos nas Regiões mais Prováveis de Estabilidade

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma nova abordagem para análise da primeira região mais provável de estabilidade de NCSs reais. Apresenta-se a metodologia proposta para determinação da região mais provável de estabilidade e uma análise dos efeitos das estatísticas dos atrasos na determinação da região de estabilidade, parte das análises apresentadas neste capítulo bem como a descrição da metodologia está publicada em [Batista e Jota, 2014]. Os resultados são avaliados inicialmente através de um estudo simulado aplicado a um exemplo muito usual (*benchmark*) da literatura, em seguida em um filtro passa-baixas de primeira ordem e nas plantas físicas descritas no Capítulo 4.

Vale ressaltar que, o termo região mais provável de estabilidade é um termo novo, mas que neste trabalho está relacionado ao conceito de estabilidade probabilística (definido na seção 2.2 do Capítulo 2), que em outras palavras não impõem que todas as trajetórias dos estados ao longo do tempo (começando em uma dada condição inicial), devem necessariamente (100% do tempo) estar confinadas a uma região limitada (definida por um parâmetro ϵ , vide Capítulo 2), ou seja, permite-se que eventualmente as trajetórias dos estados saiam da região

confinada (por pequenos instantes de tempo) desde que tenha pequena probabilidade (arbitrária) de ocorrência. E ao mesmo tempo, neste trabalho a região mais provável de estabilidade está diretamente relacionada com o limite de atraso máximo que o NCS suporta sem instabilizar-se, no sentido de que este valor de atraso máximo não é exato e sim o mais provável estatisticamente.

5.1 Descrição do Método Proposto

O objetivo do método proposto [Batista e Jota, 2014] é avaliar sistematicamente os possíveis comportamentos do sistema em malha fechada sujeito a incertezas, por meio da análise da resposta temporal. Os atrasos presentes em NCSs serão tratados como parâmetros incertos. Isto permitirá a avaliação da aplicabilidade das várias técnicas de controle para solucionar os problemas mais comuns encontrados em NCSs. A metodologia, baseada no método de Monte Carlo, acoplada com um algoritmo *Quicksort* e o método do gradiente para busca e convergência, tem o intuito de fornecer limites menos conservadores de estabilidade, ou equivalentemente, as regiões mais prováveis. A precisão dos algoritmos de Monte Carlo depende da representatividade das amostras aleatórias. Melhores resultados são alcançados aumentando o número de amostras. Os resultados só garantem que todos os possíveis comportamentos do sistema foram analisados se o limite do número de amostras tenderem para infinito, entretanto, é possível assegurar as regiões mais prováveis de estabilidade. As regiões mais prováveis de estabilidade podem ser probabilisticamente garantidas com um número finito (relativamente grande) de amostras. O método proposto indica um índice de fronteira de estabilidade mais realístico para aplicações práticas.

A idéia do método proposto é: (i) gerar os parâmetros incertos presentes em NCSs reais (de forma aleatória usando o método de Monte Carlo ou incrementalmente, dependendo do parâmetro analisado); (ii) simular (durante uma janela temporal de n amostras) o sistema em malha fechada com os parâmetros incertos gerados e um dado controlador; (iii) avaliar se o comportamento da resposta tem-

poral (ao degrau ou ao impulso ou à referência nula com a condição inicial de pelo menos um dos estados não nula) nesta janela de n amostras tende a instabilizar-se ou não; (iv) repetir iterativamente os passos (i)-(iii) para buscar o limite máximo mais provável dos parâmetros incertos avaliados que forneçam uma resposta em malha fechada estável. A cada iteração do algoritmo proposto um conjunto de parâmetros incertos são gerados e uma janela de dados com a saída da planta é avaliada e para alcançar o limite máximo mais provável dos parâmetros incertos, o algoritmo foi implementado com um critério de busca e convergência.

No método proposto, inicialmente considerou-se que apenas um dos parâmetros incertos (ou variáveis) presentes em NCSs é representado variando de forma aleatória (com possíveis mudanças abruptas) sendo este o atraso. Os outros parâmetros foram considerados ajustáveis e com variações relativamente lentas nos intervalos predefinidos, de forma que a dinâmica de variação não tenha influência significativa. Todas as combinações de parâmetros, com variações lentas (dentro dos limites predefinidos) são considerados. O parâmetro incerto, com possíveis mudanças abruptas, neste caso o atraso, é gerado aleatoriamente e aplicado no modelo de interesse (para todas as combinações dos outros parâmetros ajustáveis com variações lentas) e a resposta temporal (ao degrau ou ao impulso ou à referência nula com a condição inicial de pelo menos um dos estados não nula) do sistema em malha fechada correspondente é analisada. A análise da resposta temporal se baseia na avaliação dos picos da resposta do sistema em malha fechada. Os picos são avaliados para detectar se a resposta em malha fechada é assintoticamente estável ou não. Inicialmente avaliou-se os dois primeiros picos. Entretanto, o método pode ser expandido de forma semelhante, para avaliação de três, quatro ou mais picos, a fim de melhorar a precisão do valor obtido. Uma vez que o objetivo do presente trabalho é avaliar e implementar NCSs reais sujeitos a atrasos variantes, o atraso foi adotado como o parâmetro incerto aleatório (variante no tempo).

A Figura 5.1 mostra um fluxograma do núcleo do método proposto, para uma dada combinação de parâmetros ajustáveis com variações lentas. Neste fluxo-

grama, cada elemento do vetor de parâmetros incertos θ representa uma das possíveis incertezas (ou parâmetros variantes ou ajustáveis) presentes em NCSs (θ_j , com $j = 1, \dots, m$) sendo m o número de parâmetros incertos, $\theta_1(l)$ é o valor do parâmetro incerto aleatório avaliado na l -ésima amostra ($l = 1, \dots, n$) sendo n o número de amostras da janela avaliada, $\bar{\theta}_1(i)$ representa o valor máximo obtido de θ_1 na i -ésima iteração ($i = 1, \dots, i_{max}$) sendo i_{max} definido para limitar um tempo finito de execução do algoritmo caso não ocorra a convergência, $\theta_{1f}(i)$ é o valor filtrado de $\bar{\theta}_1(i)$ e α_1 é a resolução escolhida. A cada iteração i , n amostras da resposta temporal do sistema em malha fechada sujeitos às incertezas são avaliadas. No estudo de caso simulado no presente trabalho, o atraso é considerado o parâmetro incerto θ_1 aleatório com variações bruscas e os ganhos do controlador são considerados parâmetros ajustáveis (adaptativos) com variações lentas. O parâmetro incerto θ_1 é gerado de forma aleatória com uma determinada distribuição (tal que, $\theta_{1min} < \theta_1(l) < \theta_{1max}$) e os outros parâmetros ($\theta_2, \dots, \theta_m$), com variações lentas nas faixas consideradas, para todas as combinações permitidas. O valor inicial máximo $\bar{\theta}_1(1)$ é também gerado aleatoriamente. O valor $\bar{\theta}_1(i)$ é incrementado ou decrementado de modo a buscar o limite máximo de $\bar{\theta}_1(i)$ que forneça uma resposta em malha fechada estável, primeiro utilizando um método de partição baseado no algoritmo *Quicksort* e, depois, um método de busca baseado no gradiente.

Inicialmente, o algoritmo baseado no *Quicksort* é usado para chegar rapidamente perto da região de fronteira da estabilidade, depois um algoritmo baseado no método do gradiente, é utilizado para alcançar uma maior precisão. O algoritmo baseado no *Quicksort* termina quando o valor de $\bar{\theta}_1(i)$ implica em respostas (ao degrau ou ao impulso ou à referência nula com a condição inicial de pelo menos um dos estados não nula) estáveis e instáveis sequencialmente para quatro repetições consecutivas, o que indica que a região de fronteira de estabilidade foi encontrada. Subsequentemente, um algoritmo baseado no método de gradiente é aplicado para obter a convergência com a precisão necessária. No algoritmo baseado no método de gradiente, considera-se que a derivada da função de vari-

ação de $\bar{\theta}_1(i)$ é constante e definida por um fator δ_1 , que representa o percentual de aumento ou decremento de $\bar{\theta}_1(i)$ a cada iteração, o valor de δ_1 deve ser escolhido compatível com a ordem de grandeza e com a resolução desejada para o parâmetro avaliado.

As amplitudes do primeiro e segundo picos das respostas temporais são inicialmente consideradas para a análise da resposta temporal da malha fechada. Se a amplitude do segundo pico é maior do que a do primeiro (indicando uma possível resposta instável), o valor do limite superior do parâmetro incerto aleatório $\bar{\theta}_1(i)$ é decrementado na iteração seguinte ($\bar{\theta}_1(i+1) = (1 - \delta_1)\bar{\theta}_1(i)$). Se a análise do primeiro pico indica uma resposta amortecida, o limite superior do parâmetro incerto aleatório é incrementado na iteração seguinte ($\bar{\theta}_1(i+1) = (1 + \delta_1)\bar{\theta}_1(i)$). Espera-se que, pelo menos assintoticamente, as simulações tendam a indicar um limiar dos parâmetros incertos aleatórios que impliquem em respostas estáveis (para todas as combinações possíveis dos outros parâmetros incertos ou ajustáveis com as variações lentas nas faixas consideradas). O algoritmo proposto também introduz um fator de esquecimento, com uma janela de tempo adequadamente escolhida, que, no presente trabalho, corresponde a 10% do número máximo de iterações i_{max} , sendo que i_{max} foi escolhido igual a 1000 nas simulações realizadas. Assim, sempre que o máximo valor alcançado, $\bar{\theta}_1(i)$, exceder o valor filtrado, $\bar{\theta}_{1f}(i)$, o filtro é reiniciado com $\bar{\theta}_{1f}(i) = \bar{\theta}_1(i)$; caso contrário, $\bar{\theta}_{1f}(i) = \beta_1\bar{\theta}_{1f}(i-1) + (1 - \beta_1)\bar{\theta}_1(i)$.

O critério de parada é estabelecido com base na resolução α_1 escolhida, se diferença entre o valor máximo filtrado obtido para a iteração corrente, $\bar{\theta}_{1f}(i)$ e o calculado na iteração anterior $\bar{\theta}_{1f}(i-1)$ for menor ou igual a resolução escolhida ($\bar{\theta}_{1f}(i) - \bar{\theta}_{1f}(i-1) \leq \alpha_1$) então o algoritmo termina. Caso a resolução escolhida não seja atendida, o algoritmo irá executar i_{max} iterações e finalizar, como já dito, este limite de iterações foi estabelecido para garantir um tempo finito de execução do algoritmo. É importante ressaltar que, o valor de α_1 deve ser escolhido de acordo com a magnitude de $\bar{\theta}_1$ (que pode, por exemplo, ser considerada em termos de períodos de amostragem). No presente trabalho, a

resolução α_1 foi escolhida proporcional ao período de amostragem, uma vez que este foi considerado uma boa métrica para relacionar a magnitude dos atrasos, no sentido de se avaliar a relação atraso/período de amostragem. O algoritmo fornece o limite superior dos parâmetros incertos para a região mais provável de estabilidade do NCS em questão. O critério permite uma análise sistemática dos possíveis comportamentos de NCSs sujeitos a incertezas. Assim, espera-se que o método seja mais adequado para análise em aplicações práticas. Exemplos de NCSs simulado e reais, com os atrasos incertos gerados aleatoriamente, são apresentados nas seções a seguir. Um estudo simulado é realizado com intuito de permitir uma comparação com outros métodos de análise de estabilidade de NCSs disponíveis na literatura. No presente trabalho o método proposto foi implementado considerando um único parâmetro incerto variando de forma aleatória, sendo este o atraso que é foco das análises. Entretanto, o método pode ser expandido para mais de um parâmetro aleatório mas, para tanto, é necessário que as faixas prováveis de variação dos parâmetros sejam determinadas. Para o caso do atraso o objetivo é buscar, na faixa de zero a infinito, o valor máximo. Para outros parâmetros, deve-se primeiro determinar se o critério de busca será estabelecido pelo valor máximo, mínimo ou em uma faixa específica.

5.2 Estudo Simulado

Na análise desta seção é utilizado o modelo extraído de [Heemels et al., 2010]. Este modelo é um exemplo de referência (*benchmark*) frequentemente utilizado na literatura de NCS. Ele foi escolhido para permitir uma base de comparação com outros métodos. A planta é representada pela eq. 5.1:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t - \tau(t)) \\ y(t) &= [1 \quad 0]x(t) \end{aligned} \tag{5.1}$$

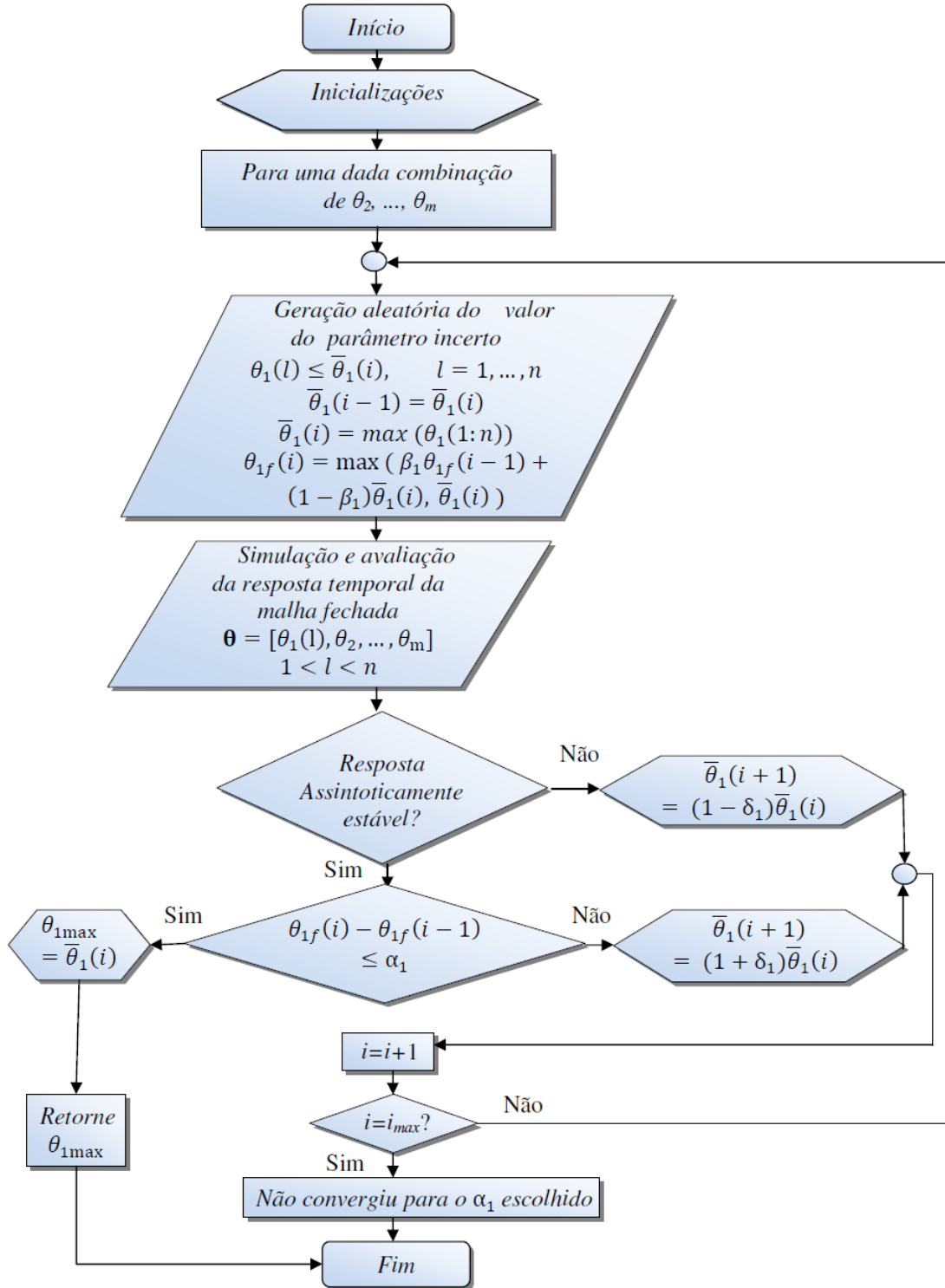


Figura 5.1: Fluxograma do método proposto.

sendo $y(t)$ e $u(t)$ a saída e entrada da planta respectivamente, $x(t)$ o vetor de estados e $\tau(t)$ o atraso variante no tempo.

A malha é fechada por meio de um controlador de realimentação de estados dado pela eq. 5.2:

$$u(t) = -[K_1 \quad K_2]x(t) \quad (5.2)$$

sendo K_1 e K_2 os ganhos de realimentação de estados (de posição e velocidade respectivamente).

Neste estudo de caso, o vetor de parâmetros incertos é dado por $\theta = [\tau, K_1, K_2]$, sendo que τ é o parâmetro incerto aleatório, K_1 e K_2 são parâmetros ajustáveis. K_2 varia na faixa de $1 < K_2 < 20$ e K_1 foi considerado ajustável na faixa $1 < K_1 < 20$ e fixo igual a 3,75 como adotado em [Heemels et al., 2010]. Ressalta-se que estes valores de ganhos foram escolhidos para permitir uma comparação com o trabalho de [Heemels et al., 2010]. Os atrasos variantes τ são gerados aleatoriamente com distribuições gaussiana e uniforme (tal que $\tau_{min} < \tau(t) < \tau_{max}$).

Uma arquitetura de NCS como ilustrada na Figura 1.1 é considerada para analisar os efeitos das estatísticas dos atrasos na determinação das regiões de estabilidade. Neste estudo simulado considerou-se que a rede está entre controlador e atuador, isto é, $\tau_{ca} = \tau$ e $\tau_{sc} = 0$.

Para simular os efeitos dos atrasos variáveis, um modelo discreto superamostrado (com o período de amostragem $h_2 = h/200$, sendo $h = 1s$ o período de amostragem principal) foi adotado, de forma a gerar os atrasos variantes em cada instante inter-amostras, $t = kh_2$ ($h_2 \ll h$), sendo k a k -ésima amostra considerando os atrasos como múltiplos inteiros de h_2 . O modelo discreto equivalente (em h_2) usado nas simulações é dado pela eq. 5.3:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0.005 \\ 0 & 0.995 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.0000012 \\ 0.0004999 \end{bmatrix} u(k - \tau(k)) \\ y(k) &= [1 \quad 0]x(k) \end{aligned} \quad (5.3)$$

sendo os atrasos $\tau(k) \in [0, \tau_{max}]$ e τ_{max} múltiplo de h_2 . A discretização foi realizada usando um extrapolador de ordem zero e a condição inicial do vetor de estado utilizada nas simulações foi $x_0 = [1 \ 0]^T$.

A resolução adotada para a convergência do algoritmo foi $\alpha_1 = 0,005$, escolhida heurísticamente igual a $h/200$, sendo esta também a resolução do atraso. Adotou-se o valor do fator $\delta_1 = 0,5\%$, de forma que, para um atraso igual a um período de amostragem ($h = 1s$) o valor de $0,5\%$ corresponde a um incremento ou um decremento de $5ms$ que é a resolução do atraso escolhida.

5.2.0.4 Validação para Atraso Fixo

Para validar o método de busca e os critérios de parada do algoritmo proposto, inicialmente foram utilizados atrasos constantes. A Figura 5.2 mostra os limites de atrasos máximos (τ_{max}) em função do ganho de velocidade K_2 , obtidos por meio da análise da margem de fase que assegure a estabilidade para o atraso constante máximo (Eq. 5.4) e por meio da simulação numérica com avaliação da resposta temporal.

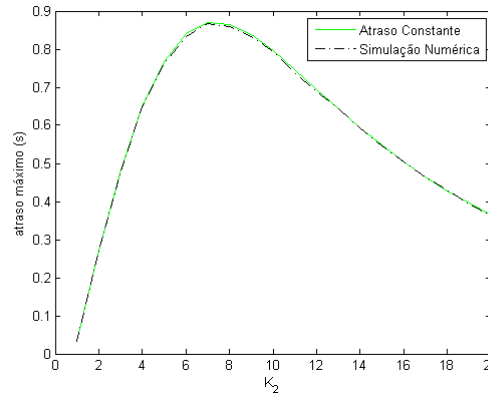


Figura 5.2: Atrasos máximos constantes obtidos pela análise da margem de fase e simulação numérica.

$$\tau_{max} = \frac{P_m}{W_{cp}(180/\pi)} \quad (5.4)$$

sendo P_m a margem de fase e W_{cp} a frequência de cruzamento de fase (em 0 dB). Vale destacar que para a análise da margem de fase utilizou-se a planta contínua

com extrapolador de ordem zero que equivale ao sistema discreto. Observa-se que o método numérico apresentou bons resultados e uma melhor precisão pode ser obtida com aumento do número de amostras utilizadas para simulação.

5.2.0.5 Estudo das Regiões de Estabilidade com Atrasos Aleatórios

Alguns ensaios foram realizados para avaliar a aplicabilidade do método proposto para determinação das regiões mais prováveis de estabilidade em NCS sujeito a atrasos variantes aleatórios. A Figura 5.3 mostra os valores máximos de atrasos variantes em função do ganho K_2 , obtidos usando o método proposto e atrasos com distribuições gaussiana e uniforme. Os resultados são comparados com os obtidos através do método denominado de ‘*Gridding*’, apresentado em [Heemels et al., 2010] e detalhado no Apêndice B. O método de *Gridding* é baseado em sobreaproximação politópica usando a idéia de *Gridding* com limitante em norma. Os resultados obtidos pela análise da margem de fase que assegura a estabilidade para atrasos constantes também são superpostos na Figura 5.3.

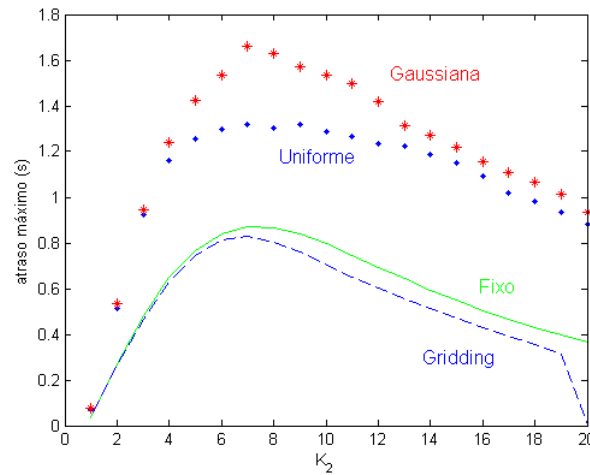


Figura 5.3: Comparação entre os atrasos máximos (indicando as regiões mais prováveis de estabilidade): *Gridding* (linha tracejada), método proposto com atrasos aleatórios gaussiano (asteriscos), método proposto com atrasos aleatórios uniforme (pontos) e atraso constante (linha contínua).

É interessante notar que o atraso máximo a que este NCS pode ser proba-

bilisticamente submetido é maior do que os atrasos máximos fixos (constantes). Este resultado, aparentemente inesperado, pode ser explicado pelo efeito de ‘compensação’ causado pelas variações de atrasos em cada amostra (uma variação de atraso positiva pode ser seguida por uma negativa, e assim por diante) e devido às variações dos atrasos, a duração do sinal de controle efetivamente aplicado a planta é, de fato, variável (como descrito na seção 1.2 e ilustrado na Figura 1.3). Como consequência, ao projetar NCSs para aplicações reais, se considerarmos apenas o limite máximo para os atrasos constantes como condições reais, os resultados serão muito mais conservadores do que o necessário. Isto pode implicar em uma redução significativa do desempenho ou pode ainda indicar a não existência de um controlador factível para as condições (limítrofes) consideradas.

A Figura 5.3 também destaca, comparativamente, os valores de atrasos máximos obtidos por cada um dos métodos: *Gridding*, método proposto com atrasos com distribuições gaussiana e uniforme e análise da margem de fase para atrasos constantes. Os tempos de execução dos métodos foram: 0,3s pela margem de fase, 952s pelo método de *Gridding*, 691s pelo método proposto com atrasos com distribuição uniforme e 699s pelo método proposto com atrasos com distribuição gaussiana. Observa-se que usando o método proposto o tempo de execução foi menor do que com o método de *Gridding* nestes testes, o que confirma a viabilidade do método proposto em termos de tempo de execução. Entretanto, vale destacar que o tempo de execução varia de acordo com o número de amostras e a resolução escolhida, portanto, deve existir uma ponderação entre a resolução desejada e o tempo de execução factível para cada aplicação, uma vez que o esforço computacional cresce exponencialmente à medida que se aumenta o número de amostras. Como mostrado na Figura 5.3, os limites máximos de atrasos obtidos pelo método proposto com distribuição de atrasos gaussiana foram mais elevados do que aqueles obtidos com distribuição uniforme. Isto reflete a importância de se analisar os efeitos das estatísticas dos atrasos na resposta do sistema em malha fechada para um projeto adequado.

Para analisar os efeitos das estatísticas dos atrasos em NCSs e demonstrar a

possível aplicabilidade do método proposto, o sistema da eq. 5.3 foi utilizado, com o controlador de realimentação de estado dado pela eq. 5.2, como em [Heemels et al., 2010]. Dois valores extremos dos parâmetros incertos (variáveis) foram escolhidos, sendo respectivamente $\theta = [\tau, 3.75, 1]^T$ e $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$.

A Figura 5.4 ilustra os resultados simulados para $\theta = [\tau, 3.75, 1]^T$ com 200 amostras, o atraso máximo obtido neste ensaio foi $\tau_{max} = 75\text{ms}$. A Figura 5.4 (a) apresenta o perfil dos atrasos simulados com distribuição aproximadamente uniforme em função do número da amostras. A Figura 5.4 (b) mostra o histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos entre 0 e 75ms. A Figura 5.4 (c) ilustra a resposta temporal típica do sistema em malha fechada simulado com os atrasos apresentados na Figura 5.4 (a). A resposta oscilatória (criticamente amortecida) indica que o sistema está no limiar de estabilidade, como previsto pelo algoritmo. Ao utilizar o critério de análise da margem de fase que assegure a estabilidade para um determinado atraso constante, para esta condição, ou seja, $\theta = [\tau, 3.75, 1]^T$, o valor máximo alcançado, τ_{max} , é igual a 33ms.

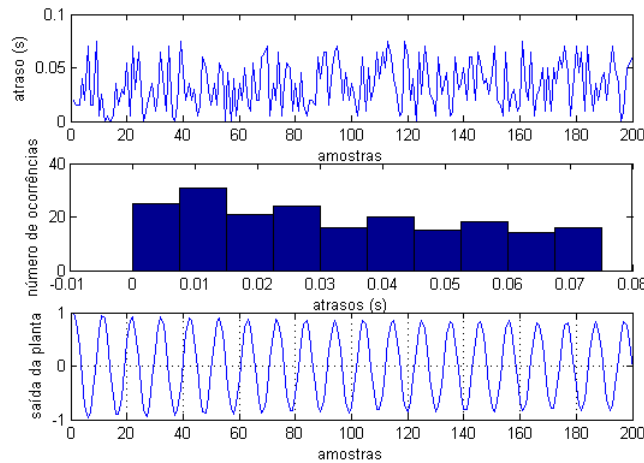


Figura 5.4: Limite de estabilidade para 5.3 com controlador 5.2 e $\theta = [\tau, 3.75, 1]^T$: (a) atrasos aplicados com distribuição aproximadamente uniforme (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 75\text{ms}$ (c) resposta temporal da malha fechada.

A Figura 5.5 mostra os resultados simulados para $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$ com distribuição dos atrasos gaussiana. Embora o valor do atraso máximo obtido ($\tau_{max} = 1,655\text{s}$) tenha sido maior do que o obtido por meio do critério de análise da

margem de fase para atraso constante ($\tau_{max} = 0,865s$) e pelo método de *Grid-ding* com atrasos variantes ($\tau_{max} = 0,803s$), o resultado da Figura 5.5 é também conservador, dado que observa-se na Figura 5.5 (c) uma resposta bem amortecida.

Uma vez que todas as respostas com o aumento da oscilação detectadas nos picos iniciais são classificadas pelo método como instáveis, para obter um resultado menos conservador com este método seria interessante avaliar as possíveis oscilações na resposta temporal em uma janela de tempo maior ou continuamente, de forma que a análise não fique restrita apenas ao primeiro e ao segundo pico da resposta temporal, ou seja, avaliar o 3º, 4º picos e assim por diante ou até mesmo as possíveis oscilações no final da janela temporal avaliada.

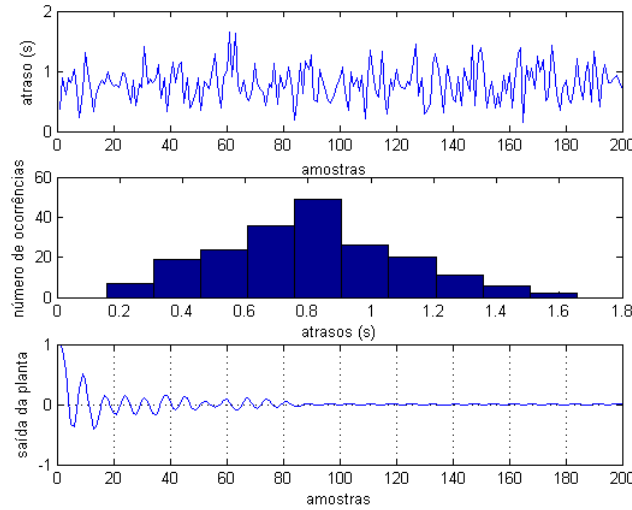


Figura 5.5: Limite de estabilidade para 5.3 com controlador 5.2 e $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$: (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 1,655s$ (c) resposta temporal da malha fechada.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de atraso máximo, atraso médio, variância do atraso e o tempo de execução, repetindo o mesmo algoritmo 10 vezes para $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$ (execução #1 a #10), com atrasos aleatórios com distribuição uniforme. A Tabela 5.2 apresenta os mesmos parâmetros para atrasos com uma distribuição gaussiana. Ressalta-se que, em todos os testes, o atraso médio obtido foi menor do que o atraso máximo constante obtido pela análise da margem de fase ($\tau_{max} = 0,865s$).

Tabela 5.1: Resultados da Simulação Numérica com $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$ e Distribuição Uniforme

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	27,68	6,649	0,623	0,132	1,300
2	19,09	5,266	0,641	0,135	1,290
3	18,07	1,302	0,663	0,132	1,265
4	42,89	2,492	0,697	0,130	1,270
5	21,03	2,826	0,689	0,146	1,370
6	40,93	4,798	0,685	0,137	1,305
7	30,46	7,401	0,659	0,149	1,325
8	27,11	1,666	0,633	0,133	1,300
9	23,39	5,953	0,640	0,147	1,305
10	43,96	2,599	0,644	0,149	1,320
Média	29,46	4,095	0,657	0,139	1,305

A Figura 5.6 apresenta um gráfico de superfície da região mais provável de estabilidade obtidos para o exemplo da eq. 5.3 simulado com três parâmetros incertos $\theta = [\tau, K_1, K_2]^T$, sendo τ o parâmetro incerto aleatório (atraso com distribuição uniforme) e K_1 e K_2 ganhos variantes (ajustáveis) (no intervalo de 1 a 20). A superfície apresenta os limites dos atrasos variantes em que o sistema se mantém estável em função dos parâmetros de K_1 e K_2 (que podem, por exemplo, serem ajustados de forma adaptativa de acordo com as variações dos atrasos para assegurar a estabilidade do sistema em malha fechada, utilizando um controlador adaptativo). O valor máximo obtido para os atrasos aleatórios com distribuição uniforme foi 1,775s para os parâmetros $K_1 = 1$ e $K_2 = 5$, entretanto, vale ressaltar que, o uso de ganhos pequenos no controlador, por exemplo, $K_1 = 1$, pode implicar em perda considerável de desempenho do sistema em malha fechada. Portanto, o uso de ganhos tão baixos devem ser analisados em cada caso e considerados com parcimônia ou temporariamente em situações extremas em que a malha está sujeita a instabilizar-se. Esta superfície pode ser útil, por exemplo, como uma métrica em estratégias de controle adaptativas, tendo em mente as especificações de desempenho a serem atendidas em cada caso.

Tabela 5.2: Resultados da Simulação Numérica com $\theta = [\tau, 3.75, 8]^T$ e Distribuição Gaussiana

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	31,02	8,607	0,807	0,087	1,655
2	25,88	3,908	0,782	0,104	1,675
3	33,15	9,270	0,783	0,096	1,665
4	45,41	1,538	0,755	0,091	1,625
5	36,14	5,104	0,781	0,086	1,570
6	32,87	9,564	0,817	0,095	1,700
7	46,09	6,499	0,815	0,088	1,650
8	42,09	5,595	0,723	0,093	1,565
9	36,98	5,512	0,779	0,106	1,505
10	30,83	8,688	0,773	0,090	1,660
Média	36,04	6,429	0,782	0,094	1,627

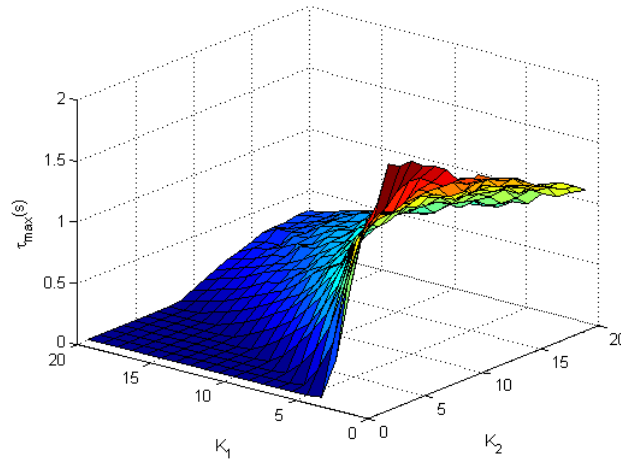


Figura 5.6: Região mais provável de estabilidade com $\theta = [\tau, K_1, K_2]^T$, sendo τ o parâmetro incerto aleatório, K_1 e K_2 ajustáveis na faixa de 1 a 20.

5.3 Estudo do Comportamento de um NCS aplicado a um Sistema Simples: Filtro Passa Baixa de Primeira Ordem

Para avaliar a aplicabilidade do método proposto em NCSs reais, inicialmente utilizou-se um sistema simples para controle da tensão em um filtro passa-baixas de primeira ordem com frequência de corte igual a $1/\tau_f$, sendo τ_f a constante de tempo. O filtro de primeira ordem (com frequência de corte igual a 1/32 segundos) foi controlado usando um controlador PI (com parâmetros $h=5s$, $T_i=5,1s$, $K_c=1$ e *setpoint* igual a 2,93V (600 bits). O NCS real foi implementado utilizando a plataforma NCS-CMUF.

A Figura 5.7 (a) mostra os dados reais medidos (com um intervalo de mais de 100 horas controlando em tempo real) da saída da planta, a Figura 5.7 (b) mostra o sinal de controle apenas no início do ensaio, uma vez que, este se manteve constante durante as horas seguintes. As figuras 5.7 (c) e (d) ilustram os atrasos e o histograma com número de ocorrências dos atrasos respectivamente. Constata-se que no controle em rede com filtro passa-baixas não ocorreu ruídos ou perturbações expressivas e os atrasos foram muito inferiores a um período de amostragem, conseqüentemente, a planta permaneceu sob controle sem oscilações na resposta após a estabilização. Os atrasos, neste ensaio, foram medidos entre as mensagens do sensor e de reconhecimento do atuador ($\tau = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} + \tau_a$). Os valores do atraso máximo (igual a 236ms) e o atraso médio (igual a 14,23ms) são muito menores do que os atrasos indicados pelo método proposto, apresentados na Tabela 5.3.

A Figura 5.8 mostra um exemplo dos resultados de simulação do NCS com o filtro passa-baixas e atrasos com distribuição exponencial, o atraso máximo obtido pelo método proposto foi $\tau_{max} = 22,58s$. Na Figura 5.8 (a) são apresentados os atrasos aplicados com distribuição exponencial, na Figura 5.8 (b) o número de ocorrência dos atrasos e na Figura 5.8 (c) a resposta temporal da malha fechada. Na Tabela 5.3 são listados os valores de atraso máximo, atraso médio, variância do

atraso e o tempo de execução, repetindo o algoritmo proposto 10 vezes (execução #1 a #10), com atrasos aleatórios com distribuição exponencial.

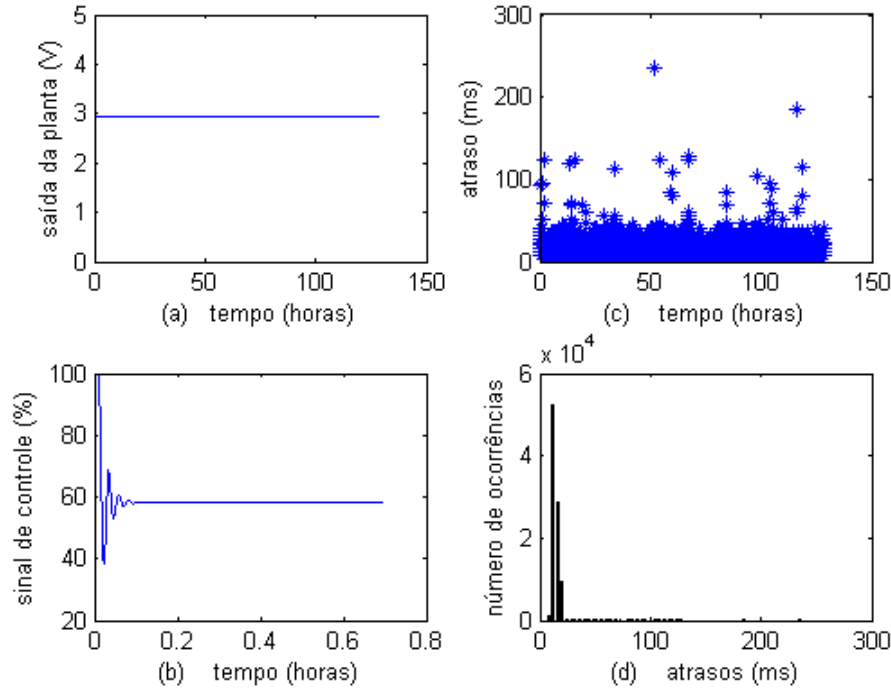


Figura 5.7: NCS real com um filtro passa-baixas (a) saída da planta (b) sinal de controle (c) atrasos (d) histograma com o número de ocorrências dos atrasos.

Como uma alternativa para obter maiores atrasos (da ordem de segundos, tal como listado na Tabela 5.3), um atraso adicional foi introduzido por meio de um *buffer* de atrasos conforme descrito na seção 3.3.2 (Capítulo 3). O *buffer* de atraso foi usado na saída do controlador para reter as mensagens de sinal de controle antes de serem enviadas para o atuador, gerando, assim, um atraso adicional τ_{Buffer} .

A Figura 5.9 mostra os dados reais de medição da saída e entrada da planta, os atrasos (com *buffer* de atrasos gerados com a distribuição exponencial) e o histograma com o número de ocorrências em cada faixa de atrasos. Os valores do atraso máximo (igual a 22,58s) e o atraso médio (igual a 4,42s) são semelhantes aos valores médios obtidos pelo método proposto. O atraso máximo (22,58s) aplicado ao NCS real é maior do que o obtido pelo critério de análise da margem de fase

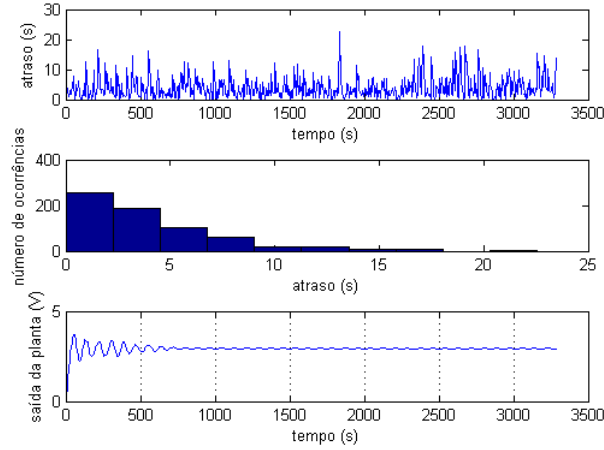


Figura 5.8: Limite mais provável de estabilidade para NCS com o filtro passa-baixas (a) atrasos aplicados com distribuição exponencial (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 22,58s$ (c) resposta temporal da malha fechada.

para atraso constante (7,16s neste caso) e a saída da planta medida confirma a resposta estável.

Tabela 5.3: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Exponencial para o Filtro Passa-Baixa

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	17,22	82,15	3,968	12,25	22,58
2	12,93	33,30	4,126	12,06	21,15
3	19,62	67,90	3,777	10,76	19,48
4	9,304	112,6	3,797	12,41	23,58
5	12,48	15,23	3,667	12,25	22,10
6	8,251	44,73	4,054	12,99	21,58
7	6,925	108,6	4,097	13,19	22,65
8	10,60	27,70	3,846	11,16	24,00
9	7,437	27,85	4,136	14,50	21,60
10	14,12	41,30	4,325	15,57	25,75
Média	11,89	41,30	3,98	12,71	22,45

5.4 Aplicação a Sistemas Físicos Reais

O método proposto foi aplicado em NCSs reais implementados com as plantas físicas descritas no Capítulo 4. Algumas condições de atrasos aleatórios foram

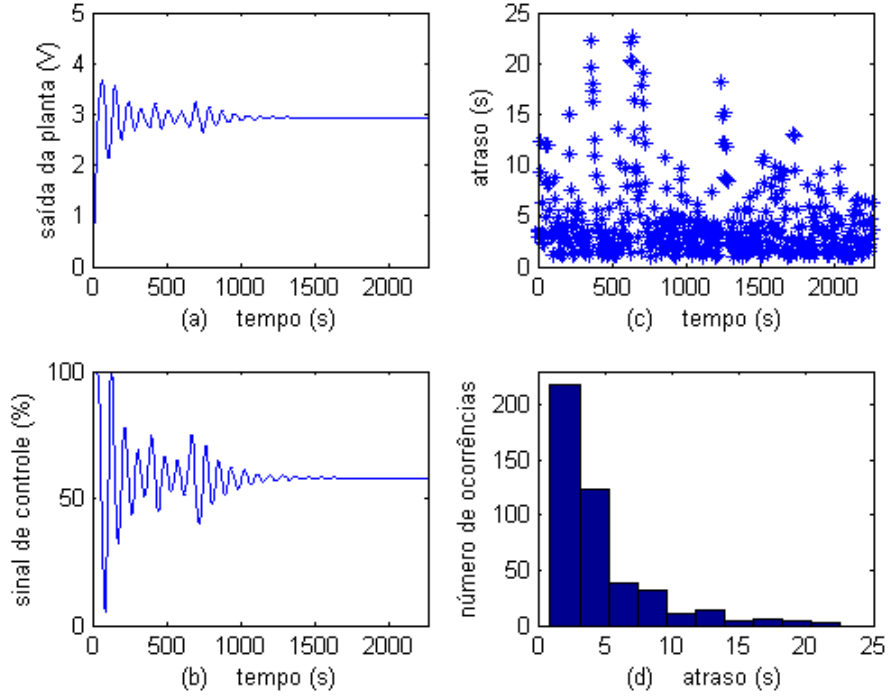


Figura 5.9: NCS real com o filtro passa-baixas e *buffer* para aumentar os atrasos da rede: (a) saída da planta (b) sinal de controle (c) atrasos (d) histograma com o número de ocorrências dos atrasos. Os atrasos foram medidos entre as mensagens do sensor e de reconhecimento do atuador ($\tau = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{Buffer} + \tau_{ca} + \tau_a$).

simuladas e os limites mais prováveis para o atraso máximo, que implica em uma resposta em malha fechada estável, foram obtidos.

5.4.1 Processo Óptico

Para análise da malha de luminosidade algumas simulações numéricas foram realizadas usando o método proposto. Primeiramente, o modelo discreto superamostrado da planta, usado na simulação, foi obtido usando $h_2 = 0,5\text{ms}$. A equação do modelo é dada pela eq. 4.2, sendo os parâmetros do modelo discreto superamostrado (discretizado em h_2) dados por $a_1 = -1,9881259$, $a_2 = 0,9881493$, $b_1 = 0,7362981 \times 10^{-5}$, $b_2 = 0,7333780 \times 10^{-5}$, $y_0 = 126$ bits, $u_0 = 0$ bits e $\theta_p = 1h = 200h_2$, com os pólos localizados em $p_1 = 0,9975155$ e $p_2 = 0,9906104$. À saída da planta, y_L , foi adicionado de um ruído de medição na simulação para se obter as condições de simulação o mais próximo possível das

condições reais. O ruído de medição adicionado na simulação foi gerado baseado no ruído real medido na planta. Para tanto, analisou-se a distribuição, média e variância do ruído real medido e gerou-se um ruído aleatório com características similares na simulação. O ruído gerado é gaussiano com média zero e variância em torno de $7,5 \text{ lux}^2$ (que corresponde à variância do ruído medido). A Figura 5.10 mostra o histograma do ruído medido e do ruído gerado em um ensaio.

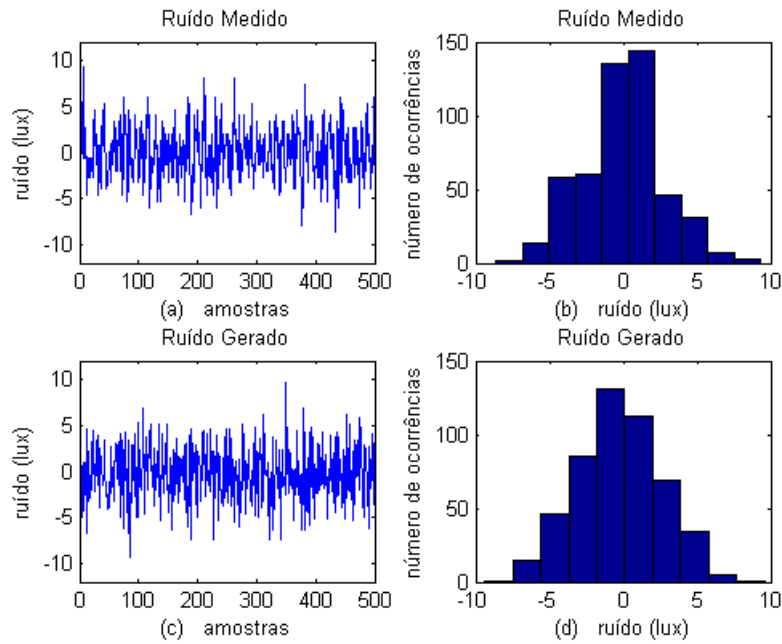


Figura 5.10: (a) Ruído medido na malha de luminosidade (b) histograma do ruído medido (c) ruído gerado para simulações em um dado ensaio (d) histograma do ruído gerado.

As simulações foram realizadas usando o controlador do tipo PI com os parâmetros de sintonia descritos no Capítulo 4 e com *setpoint* igual a 179,5 lux (350 bits). O atraso máximo constante obtido por meio da análise da margem de fase para a malha de luminosidade com controlador PI é igual a 469ms. Foram simulados atrasos com distribuições uniforme, gaussiana e exponencial.

A Figura 5.11 mostra um exemplo dos resultados de simulação do NCS com a malha de luminosidade e atrasos com distribuição gaussiana, o atraso máximo obtido foi $\tau_{max} = 785\text{ms}$, ou seja, superior a 7 amostras (já que $h=100\text{ms}$). A Figura 5.11 (a) ilustra os atrasos aplicados com distribuição gaussiana, a Figura

5.11 (b) o número de ocorrência dos atrasos e a Figura 5.11 (c) a resposta temporal da malha fechada. A Tabela 5.4 apresenta os valores de atraso máximo, atraso médio, variância do atraso e o tempo de execução (em um computador com processador Intel i3 2.4GHz e 2GB de RAM), repetindo o algoritmo proposto 10 vezes (execução #1 a #10) com 1000 amostras e atrasos aleatórios com distribuição gaussiana.

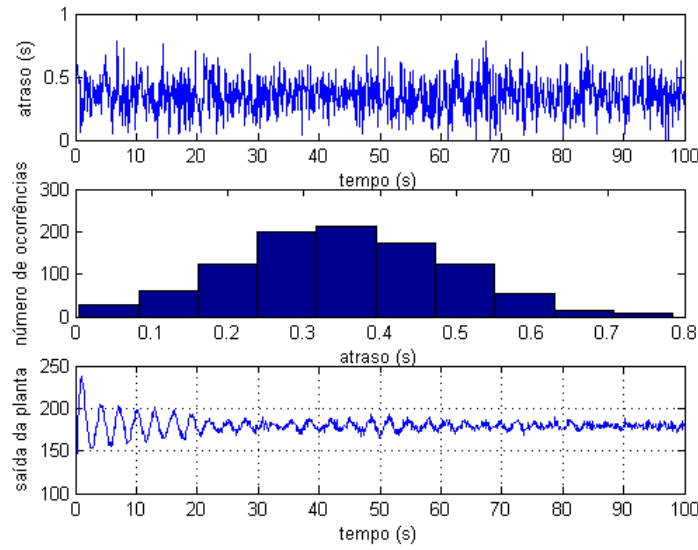


Figura 5.11: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a malha de luminosidade (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 785\text{ms}$ (c) saída da planta em lux.

O mesmo procedimento foi repetido com distribuição uniforme, exemplificado na Figura 5.12 e na Tabela 5.5. Na Figura 5.12 o atraso máximo obtido foi $\tau_{max} = 795\text{ms}$. Comparando as tabelas 5.4 e 5.5 constata-se que os valores dos atrasos máximos obtidos para as distribuições gaussiana e uniforme foram muito semelhantes (na média dos 10 ensaios foram iguais a 763ms para distribuição gaussiana e 767ms para a distribuição uniforme). Refletindo que para esta malha, nas condições simuladas, o efeito da distribuição (uniforme ou gaussiana) não foi tão pronunciado como no exemplo do *benchmark*.

Já para a distribuição exponencial, no qual os resultados são mostrados na Figura 5.13 e na Tabela 5.6, o atraso máximo obtido foi $\tau_{max}=5,985\text{s}$, ou seja, muito superior aos obtidos para as distribuições gaussiana e uniforme. Na Tabela

Tabela 5.4: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Malha de Luminosidade e Controlador PI

Ensaio #	Tempo Execução(s)	θ_1 inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	56,61	13,53	0,352	0,020	0,785
2	39,42	2,525	0,314	0,016	0,690
3	36,03	17,99	0,349	0,019	0,745
4	27,38	28,17	0,352	0,020	0,840
5	39,29	36,75	0,338	0,018	0,815
6	53,75	44,21	0,355	0,019	0,800
7	23,70	25,82	0,326	0,016	0,750
8	33,15	27,89	0,277	0,013	0,615
9	23,82	52,61	0,340	0,018	0,830
10	25,37	7,185	0,359	0,018	0,760
Média	35,85	25,67	0,336	0,018	0,763

5.6 constata-se que nas 10 execuções o atraso médio foi de $\tau_{med}=580\text{ms}$ que também é significativamente maior que os atrasos médios obtidos nas distribuições gaussianas ($\tau_{med}=336\text{ms}$) e uniforme ($\tau_{med}=381\text{ms}$).

5.4.2 Processo Térmico

As simulações numéricas, usando o método proposto aplicado à malha de temperatura do forno, foram realizadas com o modelo discreto superamostrado da planta obtido com $h_2=5\text{ms}$. A equação do modelo é dada pela eq. 4.5, sendo os parâmetros do modelo discreto superamostrado (discretizado em h_2) dados por $a_1 = -1,9916380$, $a_2 = 0,9916385$, $b_1 = -0,4470601 \times 10^{-6}$, $b_2 = -0,4458106 \times 10^{-6}$, $y_0 = 484$ bits, $u_0 = 1000$ bits e $\theta_p = 0$, com os pólos localizados em $p_1 = 0,9999367$ e $p_2 = 0,9917013$. Sendo que a saída da planta, y_T , foi acrescida de um pequeno ruído de medição na simulação. O ruído gerado é gaussiano com média zero e variância em torno de $1,092 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^2$ (que corresponde a variância do ruído medido, sendo este muito baixo). A Figura 5.10 ilustra o histograma do ruído medido e do ruído gerado em um ensaio.

As simulações também foram realizadas com o controlador PI com os parâmetros descritos no Capítulo 4, com *setpoint* igual $34,16^\circ\text{C}$ (700 bits) e atrasos

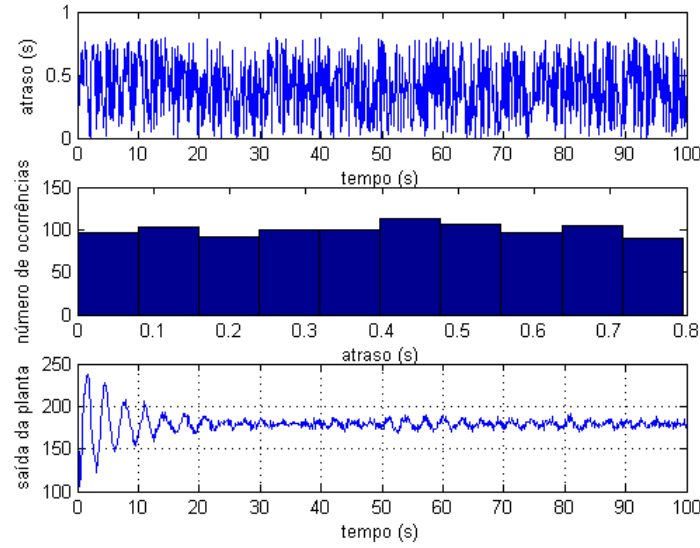


Figura 5.12: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a malha de luminosidade (a) atrasos aplicados com distribuição uniforme (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 795\text{ms}$ (c) saída da planta em lux.

com distribuições gaussiana e uniforme. O atraso máximo constante obtido por meio da análise da margem de fase para a malha de temperatura com controlador PI é igual a 22s.

A Figura 5.15 ilustra um exemplo dos resultados de simulação do NCS com a malha de temperatura e atrasos com distribuição gaussiana em que o atraso máximo obtido foi $\tau_{max} = 101,6\text{s}$. A Figura 5.15 (a) ilustra os atrasos aplicados com distribuição gaussiana, a Figura 5.15 (b) o número de ocorrência dos atrasos e a Figura 5.15 (c) a resposta temporal da malha fechada. A Tabela 5.7 apresenta os valores de atraso máximo, atraso médio, variância do atraso e o tempo de execução, repetindo o algoritmo proposto 10 vezes (execução #1 a #10) com 1000 amostras e atrasos aleatórios com distribuição gaussiana.

A Figura 5.16 ilustra um exemplo dos resultados de simulação para atrasos com distribuição uniforme e a Tabela 5.8 os parâmetros obtidos repetindo o algoritmo 10 vezes.

Nos resultados apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8, pode-se observar que uma faixa muito ampla de atrasos variantes podem ser suportados por esta malha, sendo que os atrasos médios obtidos foram superiores ao limite para atraso cons-

Tabela 5.5: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Uniforme para a Malha de Luminosidade e Controlador PI

Ensaio #	Tempo Execução(s)	θ_1 inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	49,45	22,30	0,398	0,051	0,795
2	35,64	14,04	0,337	0,039	0,675
3	43,08	7,325	0,283	0,029	0,575
4	27,31	8,180	0,424	0,061	0,845
5	28,05	31,12	0,406	0,055	0,825
6	37,44	9,910	0,432	0,058	0,855
7	41,46	4,545	0,402	0,054	0,810
8	57,15	6,245	0,398	0,051	0,795
9	26,09	7,275	0,386	0,048	0,775
10	22,31	12,99	0,348	0,041	0,720
Média	36,80	12,39	0,381	0,049	0,767

tante calculado por meio da análise da margem de fase. Este resultado não era esperado intuitivamente, portanto, decidiu-se por analisar também o período final da janela da resposta temporal simulada para verificar se de fato não havia qualquer tendência à instabilidade que não foi detectada na análise dos picos iniciais da resposta temporal. As possíveis oscilações finais da resposta temporal foram analisadas. Caso os picos finais indicassem qualquer tendência à instabilidade (amplitude da última oscilação for superior ao da oscilação anterior) a resposta foi considerada como instável pelo método proposto. Ressalta-se que, a idéia do método proposto, permite uma flexibilidade para a análise da resposta temporal, fazendo pequenas modificações no algoritmo pode-se também analisar 3, 4 ou mais picos se desejar.

A Figura 5.17 ilustra um exemplo dos resultados de simulação usando a análise dos picos finais para atrasos com distribuição gaussiana. As Tabelas 5.9 e 5.10 mostram os parâmetros obtidos repetindo o algoritmo 10 vezes para atrasos com distribuições gaussiana e uniforme, respectivamente. Os resultados confirmam que uma ampla faixa de atrasos, com médias entre 40 e 50 segundos, podem ser suportados por esta malha. Atrasos com médias muito inferiores a 40s foram observados nas medições da rede real, cujas análises foram apresentadas no Capítulo 3, portanto, espera-se que o NCS com esta malha seja capaz de suportar os

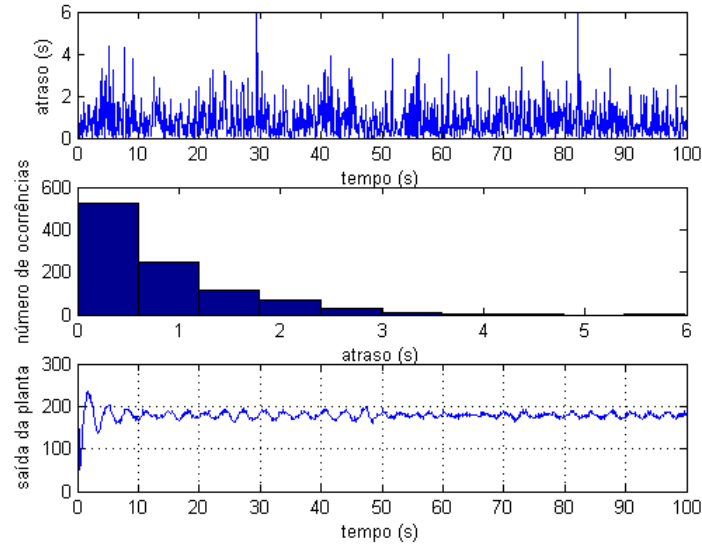


Figura 5.13: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a malha de luminosidade (a) atrasos aplicados com distribuição exponencial (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 5,985s$ (c) saída da planta em lux.

atrasos da rede real sem instabilizar-se, o que será avaliado no Capítulo 6.

5.4.3 Câmara de Refrigeração

Conforme apresentado no Capítulo 4, esta planta tem uma dinâmica muito lenta, sendo a constante de tempo adotada para o modelo igual 300 minutos (5 horas). O atraso máximo constante obtido por meio da análise da margem de fase para a malha de temperatura da câmara com controlador PI é igual a 472 minutos (aproximadamente 7,87 horas). Este valor de atraso é muito superior à faixa de atrasos observados na rede real (valores medidos apresentados no Capítulo 3), sendo que um atraso desta ordem de grandeza (interrupção da rede por mais de 7 horas) em uma rede real deveria ser considerados como falha e não como atraso ou perda de pacote.

Embora seja esperado que os atrasos naturais da rede sejam muito inferiores aos atrasos suportados por esta malha, decidiu-se por realizar algumas simulações numéricas usando o método proposto para o modelo desta planta. As simulações numéricas foram realizadas com o modelo discreto superamostrado

Tabela 5.6: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Exponencial para a Malha de Luminosidade e Controlador PI

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	39,53	8,670	0,819	0,647	5,985
2	23,34	22,80	0,491	0,238	2,875
3	29,47	6,690	0,598	0,372	3,820
4	36,86	38,60	0,511	0,264	3,440
5	27,57	14,63	0,517	0,276	3,280
6	45,80	16,84	0,530	0,243	3,085
7	10,39	5,820	0,783	0,574	4,980
8	25,70	8,390	0,483	0,235	3,545
9	50,99	28,52	0,560	0,302	3,205
10	34,67	29,08	0,505	0,252	3,770
Média	32,43	18,00	0,580	0,340	3,799

da planta obtido com $h_2 = 3s$. A equação do modelo é dada pela eq. 4.8, sendo os parâmetros do modelo discreto superamostrado (discretizado em h_2) dados por $a_1 = -0,9998333$, $b_1 = 0,7249396 \times 10^{-5}$, $y_0 = 703$ bits, $u_0 = 0$ e $\theta_p = 180s = 60h_2$. À saída da planta, y_R , foi adicionado um ruído de medição gaussiano com média zero e variância próxima de $0.06^\circ C^2$. As simulações foram feitas considerando o controlador PI, projetado no Capítulo 4, sem levar em conta o atuador especial que converte o sinal de controle em ciclo de trabalho do equipamento (descrito no Capítulo 4). Uma vez que o objetivo desta simulação é apenas apresentar uma noção da faixa de atrasos variantes que poderiam ser suportados por esta malha, mesmo sabendo que, na prática, atrasos desta ordem de grandeza têm probabilidade muito baixa de ocorrer e devem ser tratados como falhas da rede.

A Figura 5.18 ilustra um exemplo dos resultados de simulação do NCS com a malha de temperatura da câmara de refrigeração e atrasos com distribuição gaussiana. Neste ensaio foram simuladas 1000 amostras e o atraso máximo obtido foi $\tau_{max} = 1721$ minutos. A Tabela 5.8 mostra os parâmetros obtidos repetindo o algoritmo 10 vezes.

Baseado nos resultados apresentados da análise de sistemas físicos reais, constatou-se que para a malha de luminosidade que tem uma resposta dinâmica

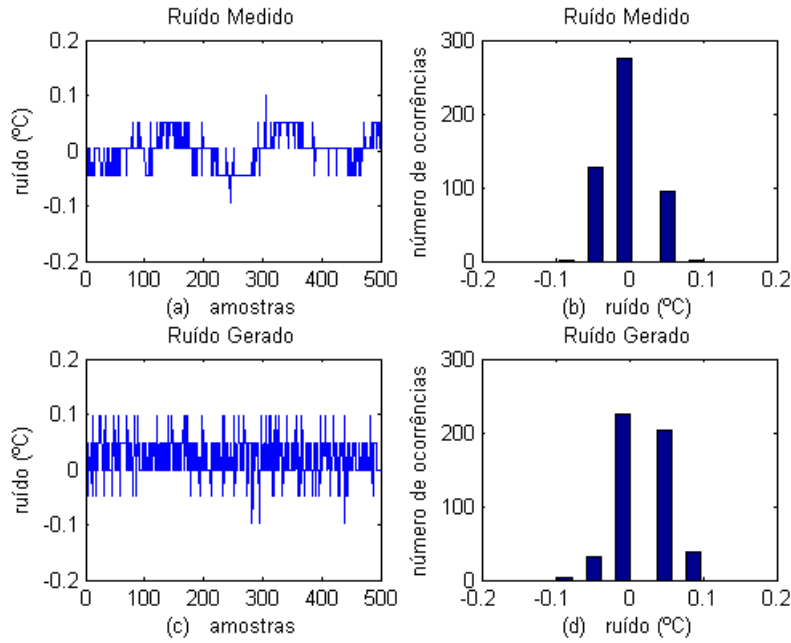


Figura 5.14: (a) Ruído medido na malha de temperatura (b) histograma do ruído medido (c) ruído gerado para simulações em um dado ensaio (d) histograma do ruído gerado.

rápida (da ordem de milissegundos) foi observado um nível de ruído mais expressivo, sendo que, para as simulações com atrasos com distribuição exponencial os limites de atrasos máximos obtidos foram muito superiores às demais distribuições analisadas, reforçando a importância de se considerar as características estatísticas dos atrasos. Na malha de temperatura do forno observou-se um nível de ruído muito baixo sendo a malha fechada bem estável, no sentido de que a mesma suporta atrasos elevados (muito superiores aos observados numa rede real que foram apresentados no Capítulo 3). Para a câmara de refrigeração os atrasos máximos obtidos, tanto para atrasos constantes por meio da análise da margem de fase quanto para atrasos aleatórios por meio do método proposto, foram extremamente elevados (em torno de horas) e de ordem de grandezas muito superiores aos observados em uma rede real (de milissegundos à alguns segundos). Portanto, os atrasos naturais da rede não devem ser um problema crítico para o NCS com a malha de temperatura interna da câmara de refrigeração e, caso um atraso de horas ocorra em um NCSs real ele deve ser tratado de fato como uma falha.

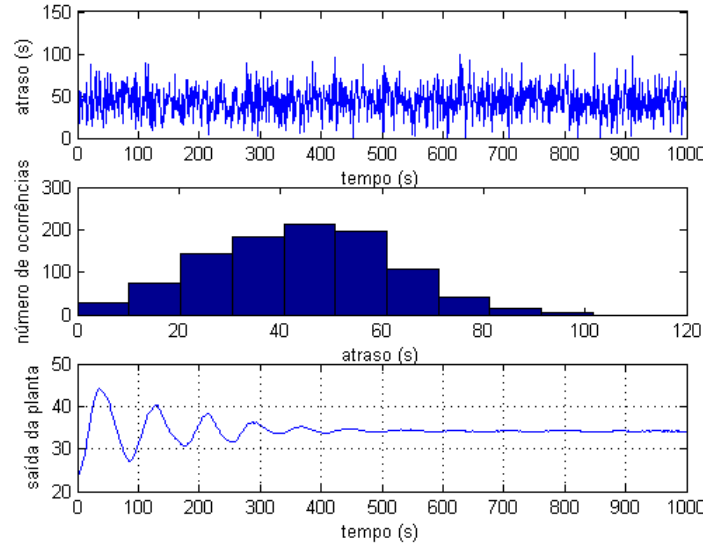


Figura 5.15: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a Planta Térmica (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 101,6s$ (c) saída da planta em °C.

5.5 Considerações Finais do Capítulo

Os resultados apresentados fornecem as regiões mais prováveis de estabilidade de NCSs. Com base nestes resultados, pode concluir-se que com o método proposto regiões mais amplas de estabilidade podem ser obtidas, quando comparadas com as obtidas a partir de métodos convencionais determinísticos apresentados na literatura.

As regiões de estabilidade em NCSs dependem da forma em que os atrasos ocorrem e os resultados apresentados mostram que para atrasos variantes, limites superiores aos obtidos para atrasos fixos podem ser suportados. O conhecimento das estatísticas dos atrasos é importante para determinar a estratégia de compensação adequada. As estatísticas dos atrasos podem ser avaliadas em tempo real e usadas em estratégias de controle adaptativas para se obter uma melhor estratégia de compensação.

Embora a consideração das características estatísticas dos atrasos tenha sido abordada em alguns trabalhos, por exemplo, [Peng et al., 2009], [Zhang, 2009], [Zhang e Wang, 2009] e [Yu, 2011], esta ainda não recebeu a devida atenção na

Tabela 5.7: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Planta Térmica e Controlador PI

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	27,98	47,26	43,89	324,2	101,6
2	30,38	46,67	41,29	262,6	85,17
3	24,50	19,26	38,47	220,3	87,49
4	28,77	45,34	40,95	267,6	97,65
5	29,89	45,12	34,35	195,7	78,90
6	30,53	65,67	55,63	476,2	126,1
7	43,35	52,20	43,75	296,8	100,3
8	34,76	13,21	43,49	280,6	95,73
9	30,60	54,54	45,48	344,0	102,3
10	22,18	7,610	30,87	147,2	68,19
Média	30,30	39,69	41,82	281,5	94,34

literatura e como esta informação pode ser efetivamente usada na análise e síntese de NCSs reais é um problema em aberto. A utilização de simulações numéricas, com base no método de Monte Carlo, se apresenta como uma alternativa interessante e merece ser explorada para aplicação em NCSs, uma vez que os limites práticos obtidos podem ser utilizados como uma métrica para projeto de controladores em rede. Uma melhor confiabilidade dos métodos numéricos pode ser obtida com a utilização de um maior número de amostras e tempos de simulação mais longos.

Ressalta-se que não é o objetivo desse trabalho apontar o método proposto como melhor metodologia para análise de NCSs, nem tampouco como uma solução exata. Objetivou-se mostrar uma alternativa aplicável para análises de NCSs reais e sobretudo apontar a necessidade de se considerar, de alguma forma, nas ferramentas propostas para análise de NCSs, as características estatísticas dos atrasos. As análises apresentadas reforçam a tese de que, para muitas aplicações reais, considerar o uso de ferramentas que limitam os atrasos a um período de amostragem é de fato muito restritivo, podendo levar, em muitos casos, a hipóteses muito distantes do problema físico real (ou pouco realísticas).

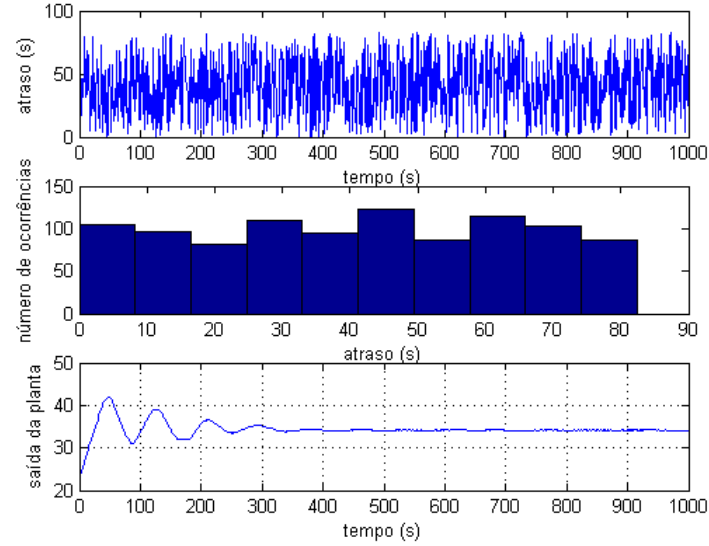


Figura 5.16: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a Planta Térmica (a) atrasos aplicados com distribuição uniforme (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 82,35s$ (c) saída da planta em $^{\circ}C$.

Tabela 5.8: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Uniforme para a Planta Térmica e Controlador PI

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	39,36	82,99	41,23	549,2	82,35
2	25,36	61,71	32,43	330,9	63,54
3	28,82	18,15	38,49	463,1	74,10
4	34,93	30,59	61,18	1175	121,3
5	36,19	30,28	30,26	286,4	59,27
6	43,16	71,65	33,82	381,1	66,84
7	22,40	52,67	28,38	257,8	55,97
8	26,11	83,31	41,44	646,2	86,89
9	31,58	40,40	41,56	546,1	80,73
10	41,08	54,97	51,95	952,5	105,5
Média	32,40	52,67	40,07	558,8	79,65

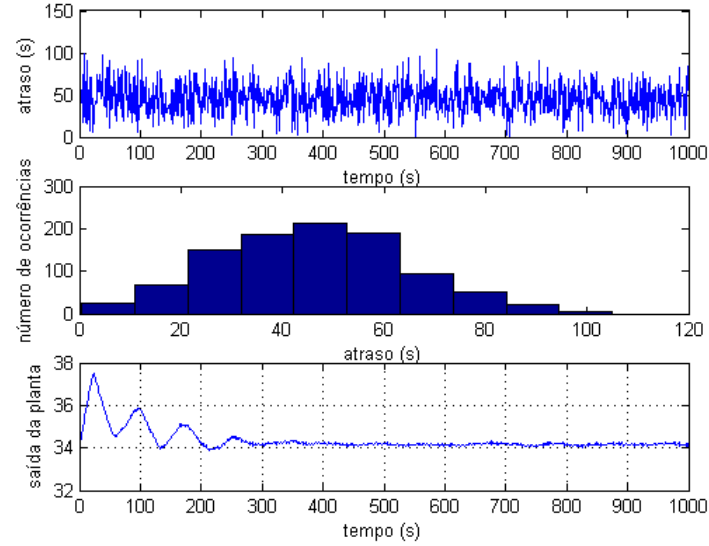


Figura 5.17: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a Planta Térmica - picos finais (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 105,0s$ (c) saída da planta em °C.

Tabela 5.9: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Planta Térmica e Controlador PI - Picos Finais

Ensaio #	Tempo Execução(s)	θ_1 inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	24,15	103,4	45,98	344,8	105,0
2	41,79	30,95	53,44	459,9	117,8
3	26,87	74,60	31,62	159,2	70,99
4	26,84	15,50	59,54	581,6	132,5
5	38,61	105,7	42,92	278,4	100,2
6	40,48	17,09	54,93	458,3	119,0
7	55,31	44,64	67,49	697,7	139,8
8	22,87	64,87	31,16	150,1	66,76
9	23,26	101,9	42,39	285,9	92,50
10	66,36	84,16	61,53	669,8	142,4
Média	36,65	64,29	49,10	408,6	108,7

Tabela 5.10: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Uniforme para a Planta Térmica e Controlador PI - Picos Finais

Ensaio #	Tempo Execução(s)	θ_1 inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	26,22	66,36	35,24	409,4	69,88
2	37,03	38,33	42,14	561,5	83,63
3	26,50	75,67	30,51	533,6	79,67
4	38,05	61,74	60,33	1199	119,8
5	32,14	46,62	48,73	813,3	97,92
6	36,47	39,57	38,62	503,1	76,65
7	36,42	131,3	63,80	1330	128,4
8	35,03	91,41	46,86	716,1	92,25
9	23,83	63,28	33,84	418,3	69,22
10	38,99	118,8	56,73	1102	113,0
Média	33,07	73,31	45,68	758,7	93,05

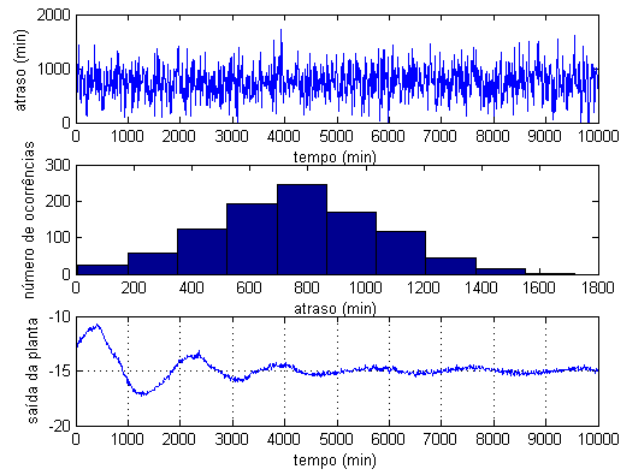


Figura 5.18: Limite mais provável de estabilidade para NCS real com a câmara de refrigeração (a) atrasos aplicados com distribuição gaussiana (b) número de ocorrência dos atrasos e $\tau_{max} = 1721$ minutos (c) saída da planta em °C.

Tabela 5.11: Resultados da Simulação Numérica com Distribuição Gaussiana para a Câmara de Refrigeração e e Controlador PI

Ensaio #	Tempo Execução(s)	$\bar{\theta}_1$ inicial	τ_{Medio} (s)	Variância	τ_{Max} (s)
1	33,40	388,5	755,9	$8,617 \times 10^4$	1721
2	32,43	308,9	1179	$2,364 \times 10^5$	2674
3	24,88	237,5	453,8	$3,353 \times 10^4$	973,7
4	22,03	587,6	557,8	$5,298 \times 10^4$	1201
5	33,77	347,3	1272	$2,720 \times 10^5$	3066
6	32,22	296,8	555,2	$4,639 \times 10^4$	1129
7	31,26	122,8	868,9	$1,128 \times 10^5$	1995
8	26,68	186,2	689,0	$8,331 \times 10^4$	1635
9	30,60	874,6	823,3	$1,046 \times 10^5$	1737
10	23,40	322,0	580,8	$5,662 \times 10^4$	1352
Média	29,07	367,2	773,6	$1,085 \times 10^5$	1748

Capítulo 6

Resultados Experimentais

Neste capítulo são descritos os ensaios experimentais realizados em NCSs reais usando a plataforma NCS-CMUF e as plantas físicas descritas no Capítulo 4. São mostrados os efeitos práticos da presença dos atrasos induzidos pela rede em um sistema de controle. Resultados dos diversos tipos de controladores implementados (descritos no Capítulo 4) são apresentados. Os NCSs foram analisados sob condições de atrasos naturais da rede e também com atrasos adicionais emulados, implementados por meio de um *buffer* de atrasos, para possibilitar a análise da influência dos atrasos no comportamento do sistema em malha fechada, sobretudo, na estabilidade.

6.1 Malha de Luminosidade

A seguir são apresentados os resultados do NCS-CMUF aplicado à malha de luminosidade, conforme detalhado no Capítulo 4. Nos ensaios realizados as estações do controlador remoto e do Servidor CMUF (vide Figura 3.2) estavam fisicamente no LCPI/UFMG e foram configuradas com IP fixo da subrede (150.164.xx.xx) da UFMG. Primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os atrasos naturais da rede assim configurada. Em seguida, são detalhados alguns resultados de ensaios realizados com atrasos artificialmente aumentados (por um *buffer* colocado no elo de realimentação). O uso deste ar-

tífico permitiu uma análise dos efeitos de atrasos maiores e eventualmente com características reproduzíveis para se avaliar diferentes tipos de controladores.

6.1.1 Ensaios com Atrasos Naturais da Rede

O comportamento de um NCS, em malha fechada, sujeito aos atrasos naturais de uma rede real são avaliados nos experimentos considerados nesta subseção. Foram realizados ensaios com os controladores com ação proporcional e integral em configurações diversas, a saber: (i) PI convencional; (ii) PI com Preditor de Smith Adaptativo (PI+PS); (iii) PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle (PI+CE) e (iv) PI com Preditor de Smith Adaptativo mais Compensação Explícita do Sinal de Controle (PI+PS+CE). O comportamento da malha em cada ensaio, bem como o perfil de variação dos atrasos, são apresentados a seguir.

6.1.1.1 Controlador PI

Os perfis da variável controlada e do sinal de controle e as características dos atrasos para a malha de luminosidade com o controlador do tipo PI são ilustrados na Figura 6.1 para uma condição típica de operação. A Figura 6.1 (a) mostra um detalhe da saída da malha sob controle durante mais de uma hora (ou 38.000 amostras) e a respectiva referência (sinal do tipo PRBS) nos instantes finais do ensaio (últimas 6000 amostras). Na Figura 6.1 (b) é apresentado o correspondente sinal de controle. A Figura 6.1 (c) apresenta o perfil de variação dos atrasos τ_{sc} , τ_{ca} e τ_{sa} . Observa-se que, no início do ensaio (até em torno da amostra 3.000), há um pequeno dessincronismo, refletido pela tendência de aumento de τ_{ca} e decremento de τ_{sc} . Este erro de sincronismo é mitigado ao longo do ensaio pelo emprego da estratégia de sincronização dinâmica que foi implementada na plataforma NCS-CMUF e utiliza o serviço de NTP padrão (conforme detalhado no Capítulo 3). Entretanto, ressalta-se que essa diferença (*offset*) entre os relógios (inferior a 10ms) que foi detectada poderá ocorrer também ao longo dos ensaios, uma vez que este nível de *offset* está dentro dos limites normalmente fornecidos pelo serviço

de NTP (no qual o *offset* fica com maior probabilidade entre 0,1ms e 10ms, mas podendo ultrapassar centenas de milissegundos com baixa probabilidade de ocorrência [Júnior, 2007]). O estabelecimento de sincronismo é um dos grandes desafios a ser enfrentado na implementação de NCSs reais. Na Figura 6.1 (d) é apresentado o histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . Pela análise das figuras 6.1 (a) e (c) não é possível perceber nenhuma correlação evidente entre os valores de atrasos máximos e oscilações de maiores amplitudes no comportamento da saída da malha. Observa-se que a resposta do sistema foi pouco afetada pela variação dos atrasos neste ensaio, uma vez que a relação atraso máximo/período de amostragem (τ_{max}/h) apresentou valor inferior a 1. Este resultado comprova que atrasos menores que um período de amostragem não afetam significativamente a resposta desta malha. Para esta condição de atrasos naturais medidos na rede, em que a relação τ_{max}/h foi inferior a 1, o controlador PI foi capaz de controlar a malha para uma referência do tipo PRBS.

Para verificar se o desempenho (surpreendentemente satisfatório) obtido com o controle PI na rede real não é devido à particularidade da referência que apresenta só 2 níveis, foram realizados ensaios em malha fechada com PI usando referências do tipo senoidal e onda triangular (figuras 6.2 e 6.3).

Os sinais de saída da malha, de controle e as características dos atrasos medidos na malha de luminosidade sob controle por um período de tempo mais longo (100.000 amostras) com referência senoidal podem ser vistos na Figura 6.2. Na Figura 6.2 (a) é mostrada apenas a parte final do ensaio para permitir uma melhor visualização da resposta. A Figura 6.3 ilustra os mesmos sinais medidos em um ensaio com referência do tipo onda triangular com 10.000 amostras. Observa-se que, o sistema seguiu a referência, tanto com variações mais suaves como a do sinal senoidal quanto com variações bruscas como as dos vértices da onda triangular. Os atrasos τ_{sa} médios medidos nos ensaios com referências senoidal e triangular foram respectivamente iguais a 52ms e 49ms. Novamente observa-se que a relação τ_{max}/h apresentou valor reduzido (inferior a 1). Vale destacar que tudo o que foi possível se fazer para alcançar condições em que os atrasos fossem

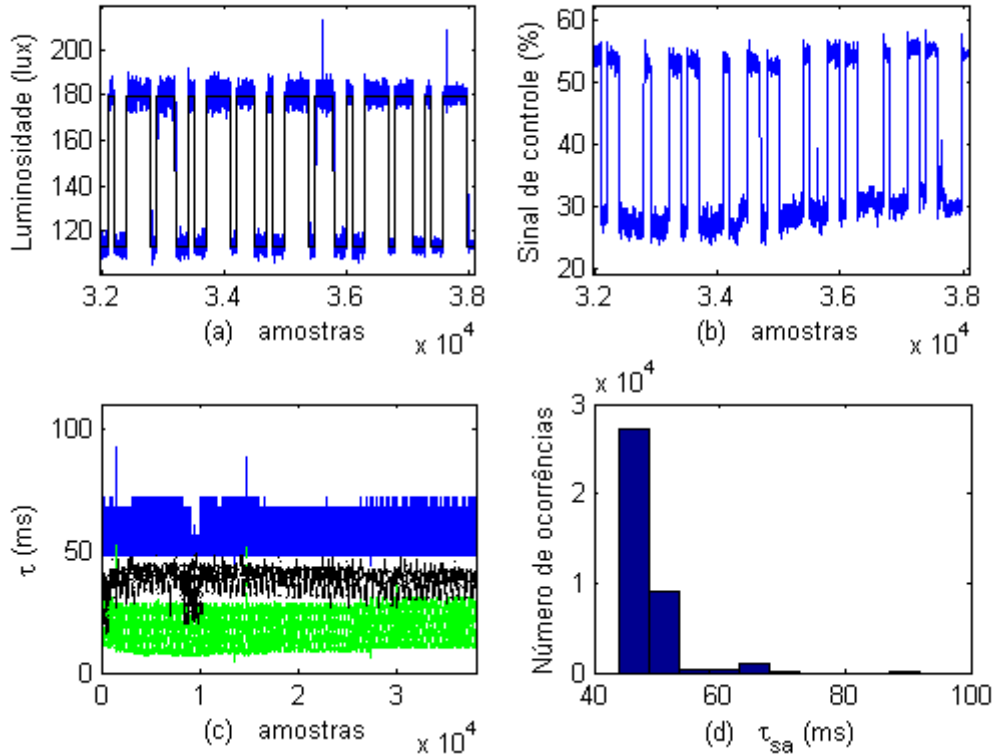


Figura 6.1: Ensaio 1, PI: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

mais relevantes (isto é, situações mais adversas) foi realizado, o que se conseguiu é apresentado e discutido na seção 6.1.2.

6.1.1.2 Controlador PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle

Conforme detalhado no Capítulo 4, a estratégia de compensação explícita do sinal de controle (PI+CE) faz uso de uma estrutura com um filtro de primeira ordem para filtrar o valor do déficit de sinal de controle acumulado. Neste trabalho, foram utilizados três valores para a constante de tempo do filtro (γ), sendo estes $\gamma=0$ (sem filtro), $\gamma=0.9$ (janela temporal de 10 amostras) e $\gamma=0.95$ (janela temporal de 20 amostras). As figuras 6.4 a 6.6 ilustram as respostas do sistema e as características dos atrasos medidos nos experimentos com $\gamma=0$, $\gamma=0.9$ e $\gamma=0.95$,

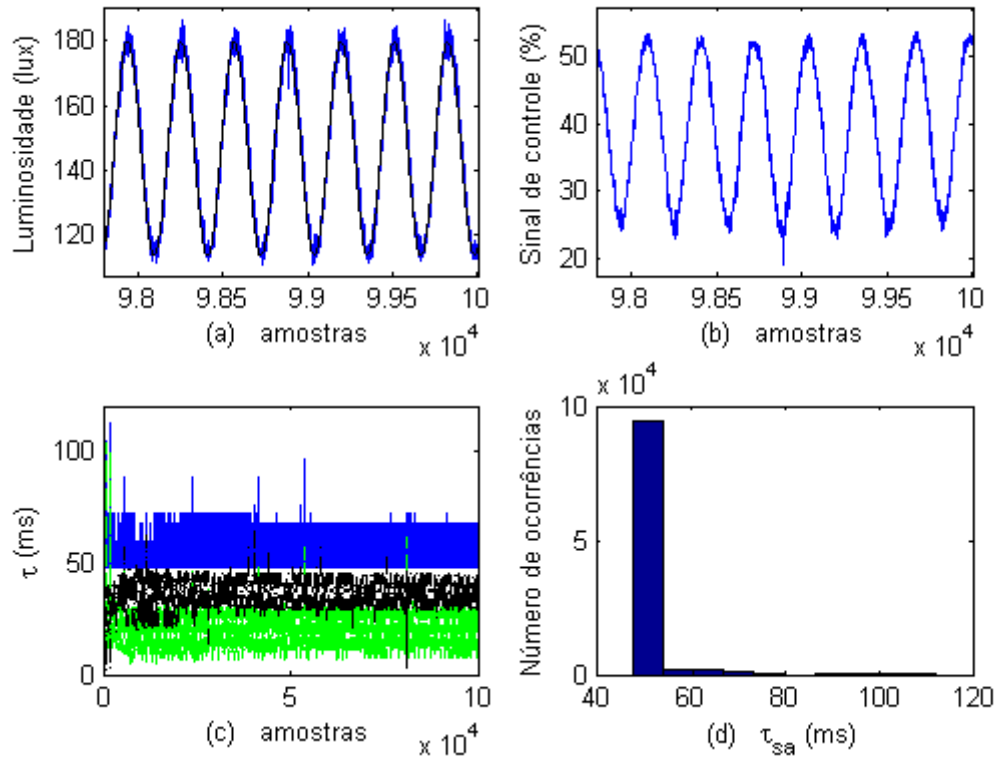


Figura 6.2: Malha de luminosidade com controlador PI e referência senoidal: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

respectivamente.

Dado que a relação τ_{max}/h também foi pequena (pouco maior que 1, já que o atraso máximo foi inferior a 110ms sendo o período de amostragem igual a 100ms) nos três ensaios, não se constata uma melhoria expressiva com a utilização da técnica de compensação explícita nestes casos, fato que pode ser avaliado tanto pela inspeção visual como pelo valor da variância do erro que será apresentada e discutida na subseção 6.1.1.5.

Na Figura 6.6 (c) nota-se claramente o *offset* entre os relógios das estações local e remota variando ao longo do ensaio, mais uma vez, reforçando a grande dificuldade de estabelecer o sincronismo com a precisão de poucos milisegundos.

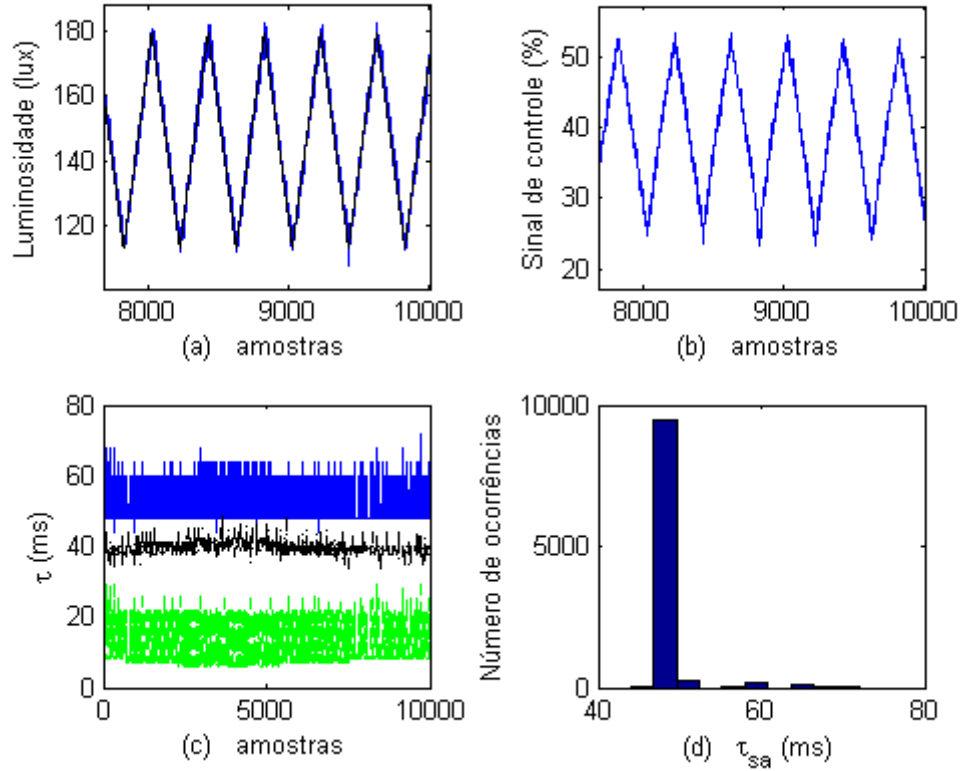


Figura 6.3: Malha de luminosidade com controlador PI e referência onda triangular: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

6.1.1.3 Controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo

Na implementação do controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo o atraso do preditor é dado pelo atraso da planta (igual a uma amostra de 100ms) acrescido do atraso da rede como descrito no Capítulo 4 (seção 4.2.1). Sendo o atraso da rede dado em função dos valores filtrados de τ_{sc} , τ_{ca} e τ_{sa} em cada um dos três ensaios realizados (Figuras 6.7 a 6.10). Como já dito e detalhado no Capítulo 4, os atrasos τ_{sc} , τ_{ca} e τ_{sa} são efetivamente medidos em tempo real por meio das estampas de tempo.

Nesses três ensaios, a ação dos controladores (Figuras 6.7 a 6.10 (b)) com Preditor de Smith são um pouco mais rápidas se comparadas com o controle convencional PI (Figura 6.1 (b)), cujos detalhes dos sinais de controle são mostrados

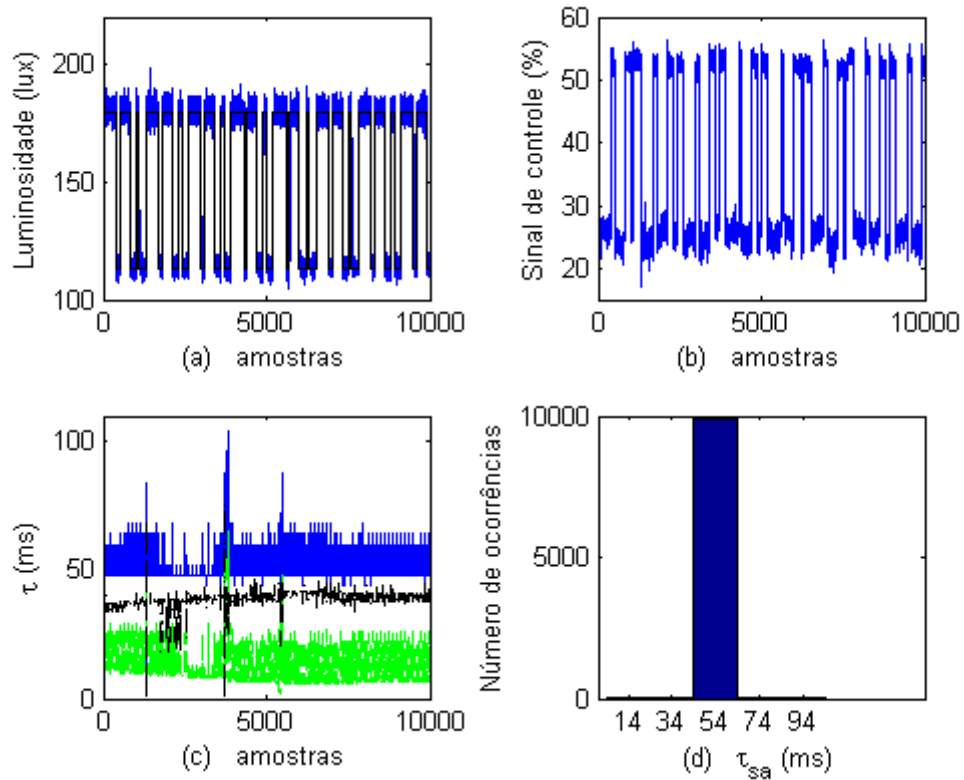


Figura 6.4: Ensaio 2, PI+CE, $\gamma=0$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

em escala ampliada na Figura 6.8 quando ocorre uma mudança de *setpoint*. A características dos atrasos medidos são mostradas nas figuras 6.7 a 6.10 (c) e (d). Embora os atrasos da rede tenha sido inferiores a um período de amostragem, o Preditor de Smith reduz também o efeito do atraso de uma amostragem da planta (devido ao A/D e D/A) o que reflete a ação do preditor na resposta. No perfil de atrasos apresentados na Figura 6.7 (c) observa-se que um maior *jitter* ocorreu entre as amostras 4500 e 9000.

6.1.1.4 Controlador PI com Preditor de Smith e Compensação Explícita do Sinal de Controle

Neste ensaio (Figura 6.11 foi utilizado um filtro com constante de tempo $\gamma=0.9$ e o atraso do preditor em função de τ_{sc} . Como apresentado no Capítulo

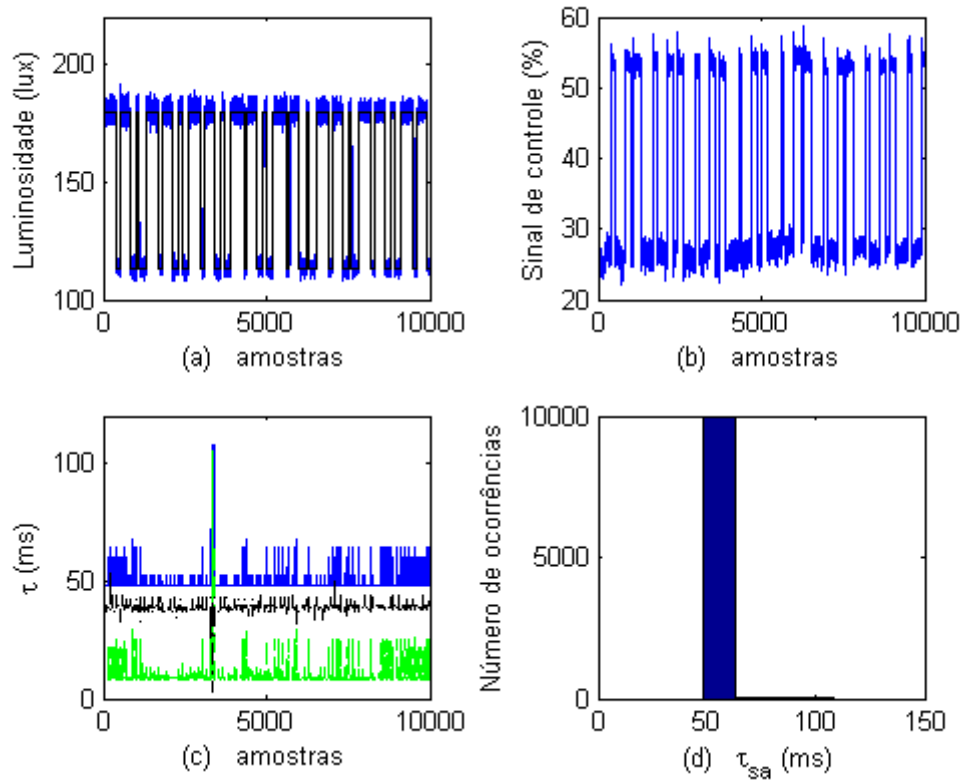


Figura 6.5: Ensaio 3, PI+CE, $\gamma=0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

4 (subseção 4.2.1.4), a proposta é compensar os efeitos dos atrasos da planta e de τ_{sc} por meio do Preditor de Smith e dos atrasos τ_{ca} pelo déficit do sinal de controle.

O sinal de controle apresentado na Figura 6.11 (b) é bem semelhante ao da Figura 6.7 (b) com picos mais elevados refletindo novamente que devido à ação do preditor a ação de controle foi mais rápida que a obtida com controlador PI (como já constatado na Figura 6.8). Não foi possível perceber visualmente nenhuma melhora significativa no desempenho se comparado aos resultados obtidos controlador PI com Preditor de Smith apresentados na subseção anterior, uma análise de alguns índices de desempenho tais como a variância do erro e da ação de controle será apresentada em seguida.

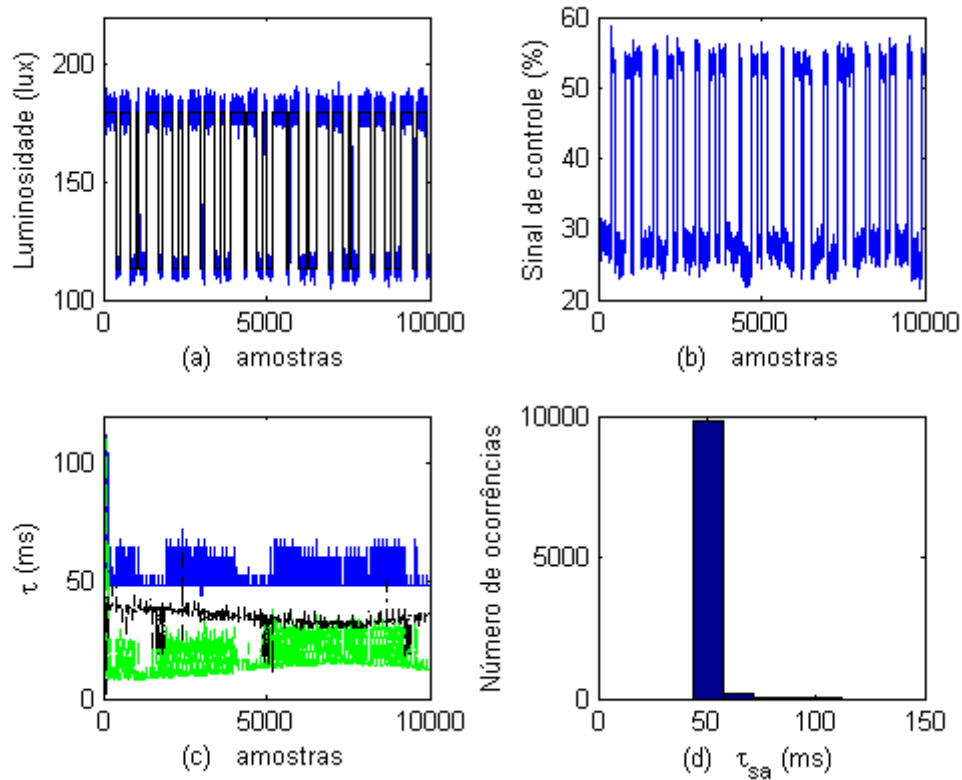


Figura 6.6: Ensaio 4, PI+CE, $\gamma=0.95$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

6.1.1.5 Comparação entre os Controladores nos Ensaios com Atrasos Naturais da Rede

A Tabela 6.1 apresenta uma comparação de resultados obtidos nos ensaios realizados na malha de luminosidade usando um sinal de referência em 2 níveis de variação (do tipo PRBS) e uma amostragem de 100 milissegundos com os diferentes tipos de controladores; são apresentados o tipo de controlador adotado, o número de amostras do ensaio, a variância do erro e do sinal de controle, o atraso τ_{sa} médio e a variância do atraso (os valores apresentados na Tabela 6.1 foram calculados entre as amostras 1000 e 10000).

Na Tabela 6.1 evidencia-se que os atrasos τ_{sa} médios nos ensaios foram semelhantes e inferiores à metade do período de amostragem, apresentando uma

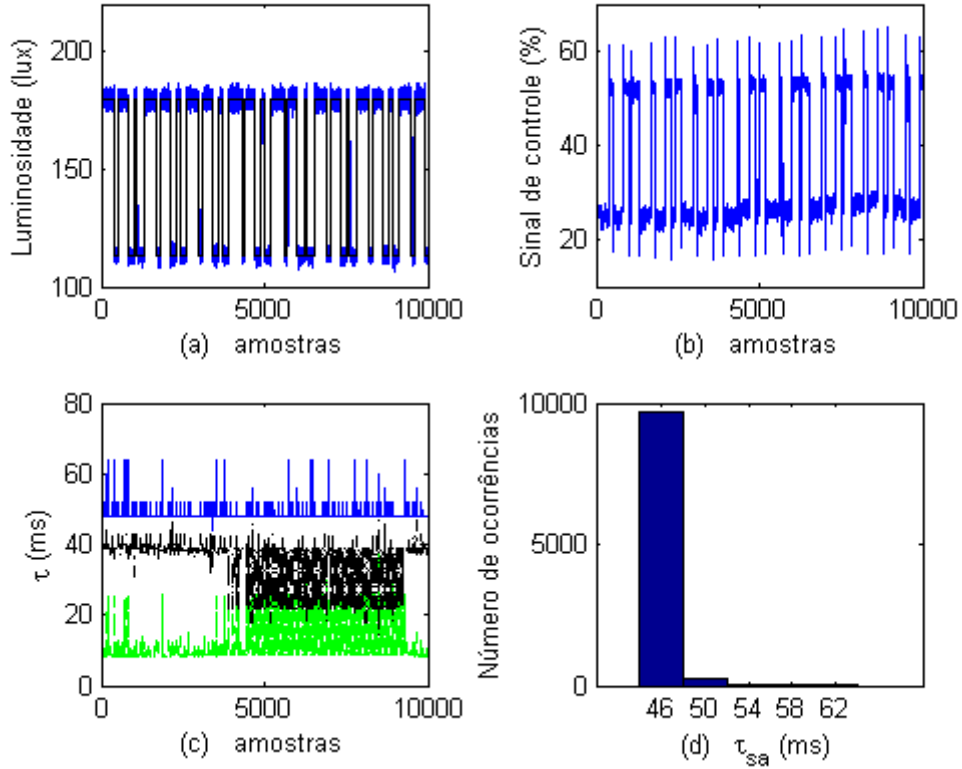


Figura 6.7: Ensaio 5, PI+PS (τ_{sc}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

pequena variância. Na Tabela 6.1, os controladores com Preditor de Smith Adaptativo (PI+PS e PI+PS+CE) apresentaram menores variâncias do erro, entretanto, ressalta-se que, não foi possível manter os atrasos idênticos nos mesmos ensaios. Conforme indicado na Tabela 6.1, para o Preditor de Smith com atraso do preditor em função de τ_{sa} (ensaio 7), uma redução em torno de 14% na variância do erro foi alcançada se comparada à variância do erro com o uso do controlador PI.

Se compararmos, na Tabela 6.1, as variâncias dos erros obtidas com o controlador com compensação explícita do sinal de controle (ensaios #2 a #4), com a utilização dos diferentes valores de γ ($\gamma=0$, $\gamma=0.9$ e $\gamma=0.95$), constata-se uma redução na variância para $\gamma = 0.9$, apontando que a escolha da constante de tempo do filtro é um fator relevante no projeto. Entretanto, para afirmações conclusivas

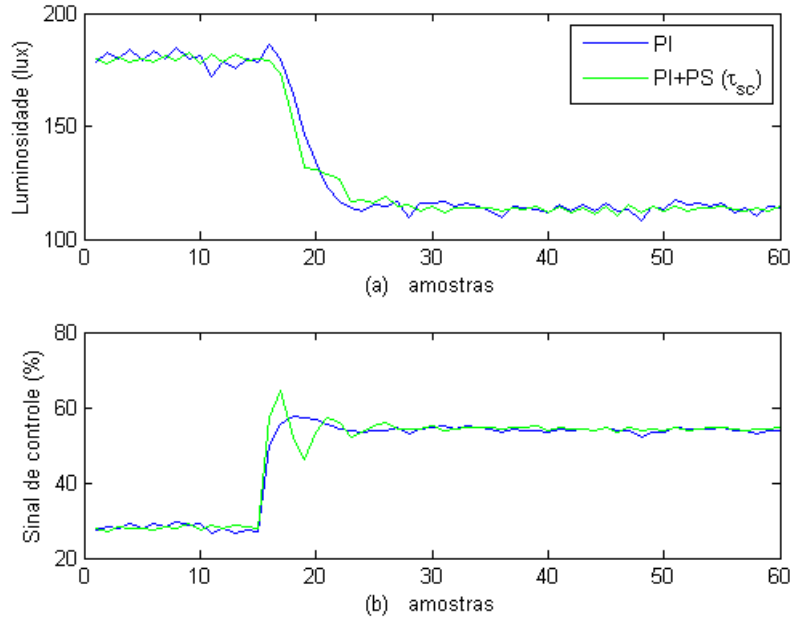


Figura 6.8: Superposição dos sinais de: (a) Saída da malha (b) sinal de controle, durante uma mudança de *setpoint* nos ensaios com controlador PI e PI+PS (τ_{sc}).

é preciso de uma análise mais detalhada, sobretudo, com o NCS sujeito a atrasos maiores, superiores ao período de amostragem, para que os atrasos provoquem efeitos mais pronunciados na resposta de saída da malha.

6.1.1.6 Considerações sobre os Ensaios com Atrasos Naturais da Rede

Ensaios experimentais foram realizados com diferentes tipos de controladores em NCSs sujeitos aos atrasos naturais da rede, sendo a constante de tempo da planta da ordem de milisegundos, mesmo com uma planta com dinâmica tão rápida os controladores apresentaram bons resultados seguindo bem a referência, tanto para referências do tipo PRBS quanto senoidal e onda triangular.

Como a relação τ_{max}/h foi pequena (menor que 1) nos ensaios realizados com atrasos naturais da rede, os efeitos dos atrasos acabaram não sendo muito pronunciados. Consequentemente, os efeitos das compensações feita pelos controladores também não foram tão expressivos nestes ensaios. Para uma melhor avaliação das eventuais melhorias que as estratégias de controle propostas podem proporcionar, nas seções a seguir serão apresentados alguns resultados de ensaios realizados na

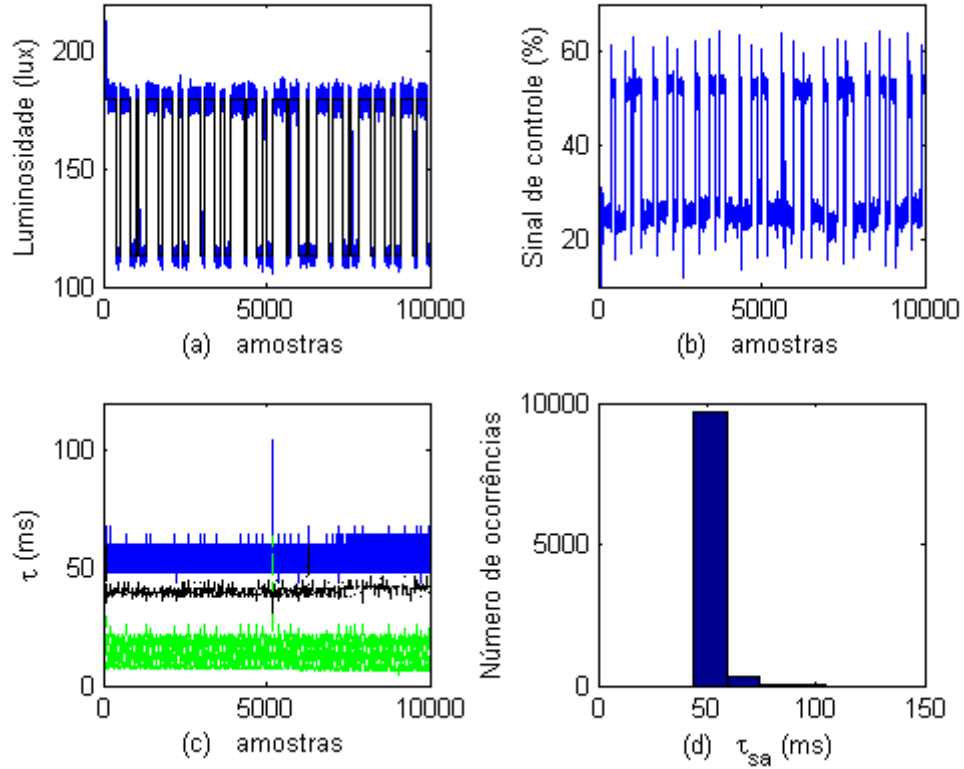


Figura 6.9: Ensaio 6, PI+PS (τ_{ca}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

malha de luminosidade usando um *buffer* artificialmente introduzido para emular atrasos adicionais no elo de realimentação.

6.1.2 Ensaios com Atrasos Adicionais (com Distribuição Uniforme, Exponencial e Gaussiana)

Alguns testes foram realizados com a inserção de atrasos adicionais por meio de uma estrutura artificial, aqui denominada *buffer* de atrasos utilizando três diferentes conjuntos de atrasos (com distribuições uniforme, exponencial e gaussiana) inseridos no *buffer*. Entretanto, por limitação de tamanho do texto, só serão apresentados dois deles, sendo estes denominados de *Buffer 1* (distribuição uniforme) e *Buffer 2* (distribuição exponencial) respectivamente.

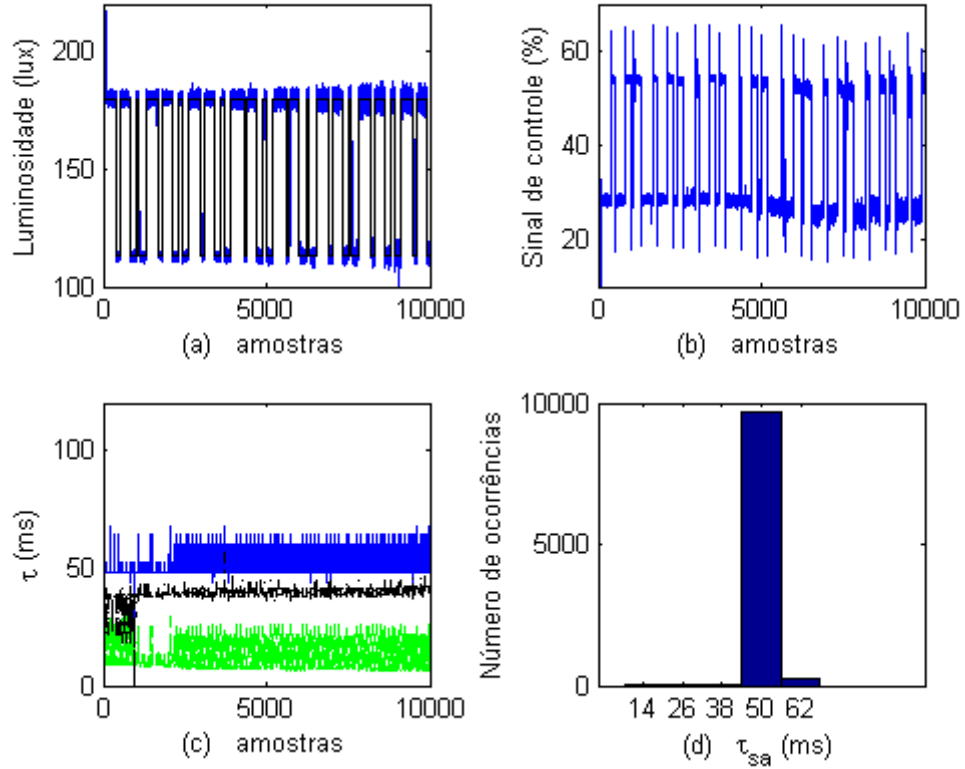


Figura 6.10: Ensaio 7, PI+PS (τ_{sa}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

6.1.2.1 Ensaios com *Buffer* de Atrasos com Distribuição Uniforme

Atrasos adicionais com distribuição uniforme foram inseridos no *link* de interconexão entre sensor-controlador. Optou-se por colocar o *buffer* de atrasos na rotina do *webserver* conforme descrito no Capítulo 3 (seção 3.3.2). A Figura 6.12 ilustra o perfil de atrasos inseridos no arquivo de texto, aqui denominados de atrasos do *buffer*, ou simplesmente τ_{Buffer} .

Embora tenham sido inseridos no *buffer* atrasos com distribuição uniforme, os atrasos que foram medidos no *link* sensor-controlador não apresentaram uma distribuição uniforme (como por exemplo, mostrado na Figura 6.13 (d)). Isto reflete a importância de se medir os atrasos reais efetivamente ocorridos nos *links* para uma análise realística; uma vez que, na rede real não se pode ter a garantia que

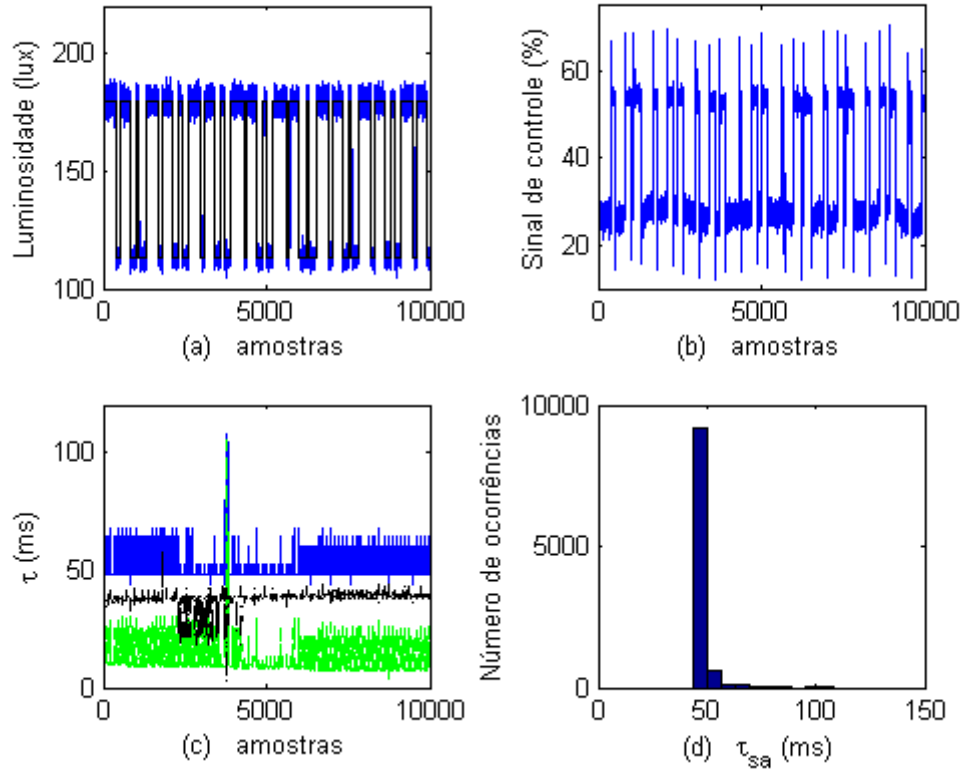


Figura 6.11: Ensaio 8, PI+PS+CE (τ_{sc} e $\gamma = 0.9$): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

uma vez colocado um determinado valor de atraso para ser emulado ou simulado, na prática ocorrerá exatamente o mesmo valor de atraso; dado que os atrasos reais medidos incluem, além dos tempos de retenção no *buffer*, os atrasos naturais da rede. Estes também podem eventualmente sofrer alguma influência devido ao escalonamento das tarefas no *webserver* resultando em atrasos adicionais. Como está fora do escopo deste trabalho a análise dos efeitos de escalonamento das tarefas, optou-se por considerar o atraso sem separar sua origem (seja oriunda do *buffer*, dos atrasos naturais da rede ou devido aos efeitos de escalonamento das tarefas). Do ponto de vista do controle em malha fechada, o que de fato interessa, como atraso total no elo de realimentação é a diferença de tempo entre o instante da medição do sensor e a atuação na planta (τ_{sa}) e como atraso entre sensor-controlador (τ_{sc}) é a diferença de tempo entre o instante da medição

Tabela 6.1: Comparação dos Controladores na Malha de Luminosidade

Ensaio #	Controlador	Nº de Amostras	Variância do Erro (lux^2)	Variância da MV ($\%^2$)	τ_{sa} Médio (ms)	Variância de τ_{sa} (ms^2)
1	PI	38084	61,80	162,6	49,71	14,76
2	PI+CE $\gamma = 0$	10000	62,79	179,5	48,63	8,302
3	PI+CE $\gamma = 0.9$	10000	58,87	170,8	48,31	4,101
4	PI+CE $\gamma = 0.95$	10000	62,14	168,3	48,51	4,872
5	PI+PS $\theta_m = \tau_{sc}$	10000	54,49	174,2	48,14	0,793
6	PI+PS $\theta_m = \tau_{ca}$	10000	57,13	178,9	48,53	6,569
7	PI+PS $\theta_m = \tau_{sa}$	10000	53,04	164,9	48,59	5,377
8	PI+PS+CE $\gamma = 0.9$ $\theta_m = \tau_{sc}$	10000	54,47	175,0	48,59	6,723

do sensor e o início do processamento da mensagem pelo controlador remoto, independentemente da origem dos atrasos.

A comportamento da saída da malha e do sinal de controle em cada ensaio, bem como o perfil de variação dos atrasos serão mostrados nas subseções a seguir.

6.1.2.2 Controlador PI - Atrasos Adicionais com Distribuição Uniforme

A saída da malha fechada com o controlador do tipo PI e os atrasos adicionais com distribuição uniforme incluídos por meio do *Buffer* 1, bem como o sinal de controle e as características dos atrasos são mostradas na Figura 6.13. Observa-se na Figura 6.13 (c) que, por volta da amostragem 1060, o atraso τ_{sa} atinge o valor de 1184ms, ou seja, chegou a ser superior a 11 amostras apesar da média ser em torno de uns 270ms. O atraso τ_{sa} permanece com valor superior a 800ms entre as amostras 1060 e 1080. Estes atrasos elevados provocam maiores oscilações na resposta do sistema, conforme ilustrado na Figura 6.13 (a), cujas oscilações

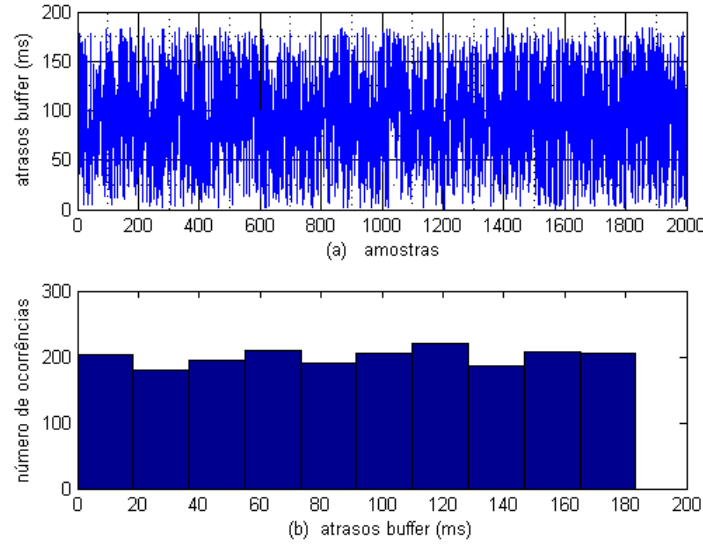


Figura 6.12: *Buffer 1* (a) atrasos (b) histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos.

têm maior amplitude após a variação de *setpoint* (que ocorre próximo à amostra 1100). Embora as oscilações na resposta da saída da malha tenham aumentado significativamente com aumento dos atrasos neste período, por volta da amostra 1180, estas oscilações de amplitudes maiores já havia sido totalmente amortecidas e o sistema permanece estável. A Figura 6.13 (d) ilustra o histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} . Constata-se que a distribuição desses atrasos não é uniforme e que 94,16% dos atrasos são inferiores a 500ms.

6.1.2.3 Controlador PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle - Atrasos Adicionais com Distribuição Uniforme

Como já dito, embora tenha sido usado os mesmos valores de atrasos inseridos no *buffer* de atrasos, não se pode garantir que os atrasos reais medidos nos *links* sejam idênticos em todos os ensaios, uma vez que estes dependem também de outras características da malha como, por exemplo, os atrasos na rede real. Nos experimentos com *Buffer 1* e $\gamma=0$, $\gamma=0.9$ e $\gamma=0.95$ (figuras 6.14 a 6.16, respectivamente), os atrasos τ_{sa} máximos foram iguais a 1184ms nos três ensaios e os atrasos médios apresentaram uma pequena variação em torno de 2.5%, sendo que,

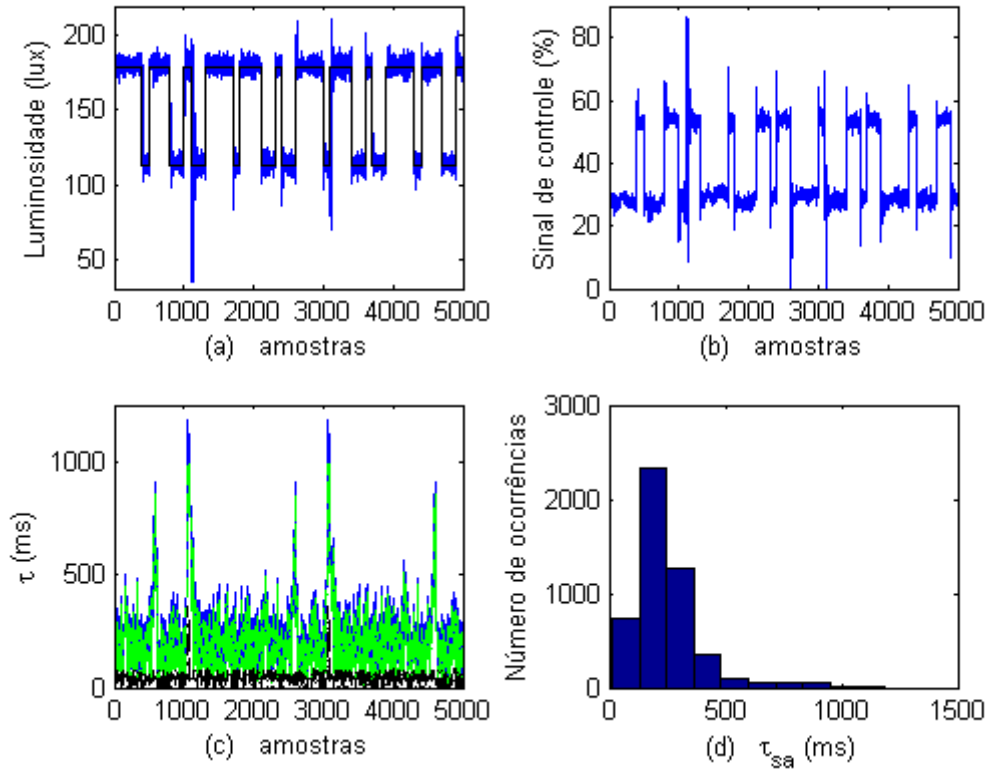


Figura 6.13: Ensaio 1, PI, *Buffer* 1: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

nos três casos, as malhas mesmo com atrasos variantes podendo até superar 11 amostras permaneceram estáveis. Comparando visualmente as respostas de saída da malha nas figuras 6.14 a 6.16 (a) em torno da amostra 1100, observa-se que a resposta no experimento com $\gamma=0$ apresenta oscilações de menor amplitude; mas não se pode garantir que este valor de γ seja o melhor a ser utilizado para compensação de todas as possíveis variações de atrasos.

Ressalta-se que, a Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle agrega a vantagem de não requerer o conhecimento sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle para prover a compensação dos atrasos. Este fato torna a estratégia bastante atraente para aplicações de NCSs reais, dadas as dificuldades de medição dos atrasos devido ao requisito de sincronismo e, sobretudo, pela impossibilidade de se conhecer o valor do atraso τ_{ca} no momento

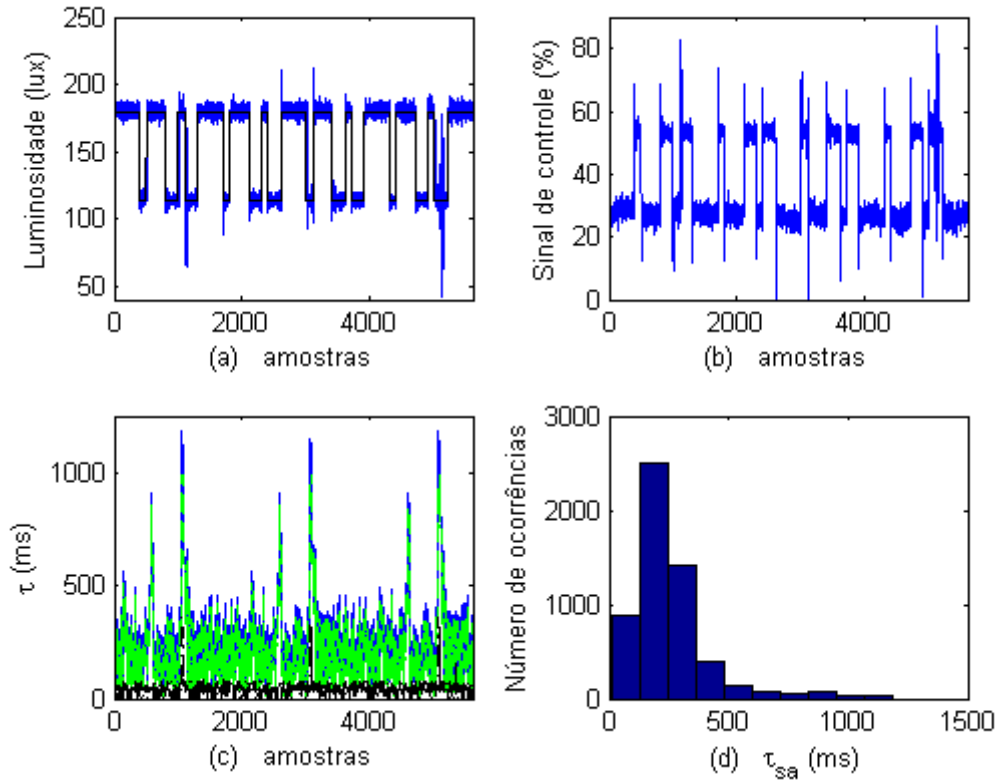


Figura 6.14: Ensaio 2, *Buffer* 1, PI+CE, $\gamma=0$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

em que o cálculo da ação de controle é realizado.

6.1.2.4 Controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo - Atrasos Adicionais com Distribuição Uniforme

Uma relação τ_{max}/h superior a 11 amostras também foi observada em alguns instantes nos três ensaios realizados usando o Preditor de Smith Adaptativo, com τ_{sc} , τ_{ca} e τ_{sa} , respectivamente (figuras 6.17 a 6.19).

Pela inspeção da Figura 6.17 (a) em torno do instante 1110, constata-se uma redução expressiva nas oscilações se comparado ao controlador PI. Na Figura 6.17 (a) logo, após a amostra 1100, as oscilações atingiram variações entre 90 e 148 lux (51% do valor de referência igual a 113 lux), sendo que, com o controlador PI (Figura 6.13), neste período as oscilações atingiram a faixa de 35 a 194 lux

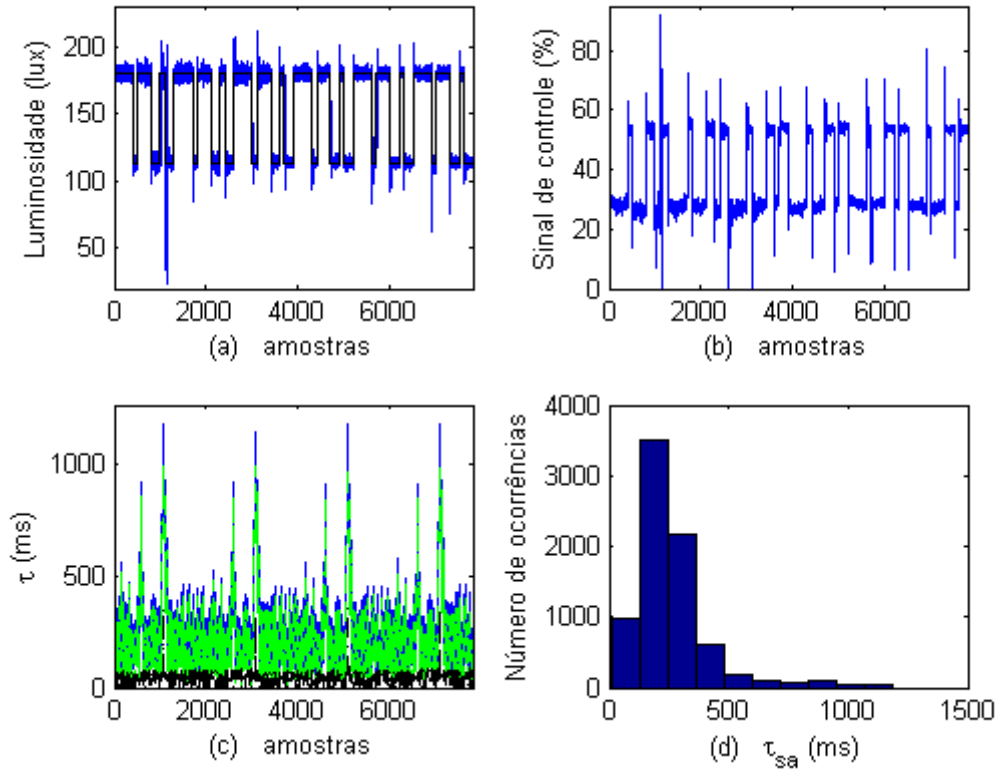


Figura 6.15: Ensaio 3, *Buffer* 1, PI+CE, $\gamma=0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

(140% do valor de referência). Apesar de, em ambos os ensaios o atraso máximo ter chegado a 1184ms, mas como já dito, a forma com que os atrasos variaram é semelhante e não idêntica. Este resultado aponta que, em sistemas de controle em rede nos quais as mensagens possuem estampas de tempo, uma compensação significativa dos efeitos dos atrasos pode ser alcançada com o uso de um Preditor de Smith Adaptativo tomando como base a média móvel dos atrasos.

6.1.2.5 Controlador PI com Preditor de Smith e Compensação Explícita do Sinal de Controle - Atrasos Adicionais com Distribuição Uniforme

As respostas da planta e do controlador PI com Preditor de Smith e Compensação Explícita do Sinal de Controle, bem como as características dos atrasos são

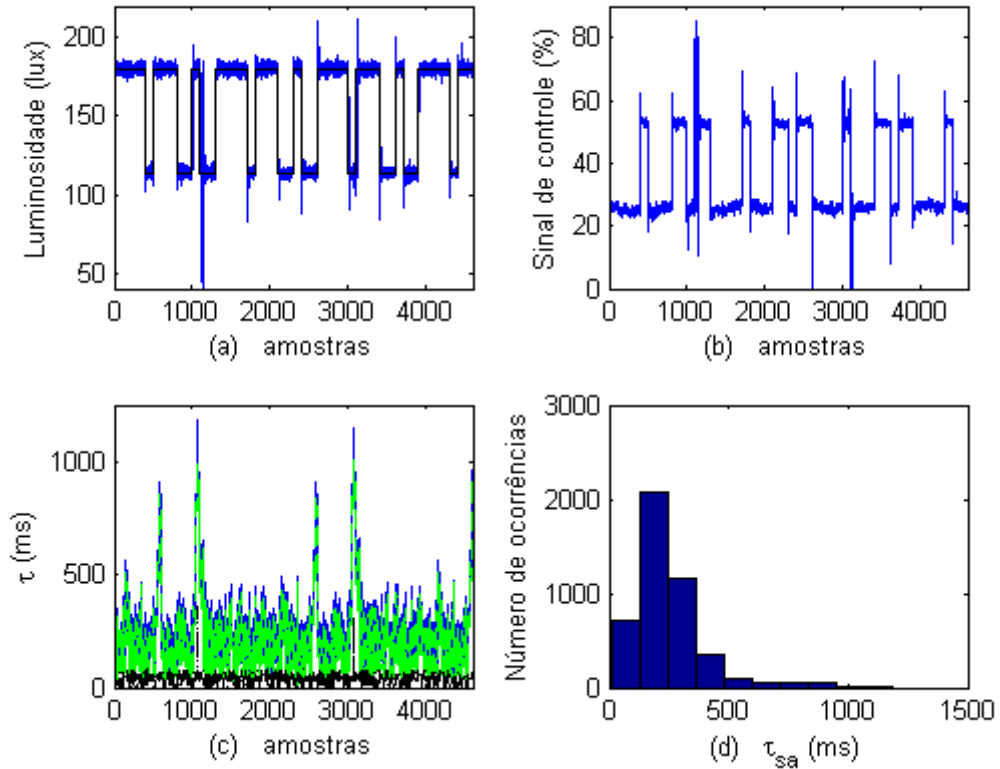


Figura 6.16: Ensaio 4, *Buffer* 1, PI+CE, $\gamma=0.95$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

apresentadas na Figura 6.20. Novamente, não foi constatada nenhuma melhoria significativa se comparada à resposta obtida com o uso apenas do Preditor de Smith.

6.1.2.6 Comparação entre os Controladores nos Ensaios com Atrasos Adicionais com Distribuição Uniforme

A Tabela 6.2 apresenta de forma comparativa alguns resultados obtidos nos ensaios realizados com diferentes controladores; são apresentados o tipo de controlador adotado, o número de amostras do ensaio (com período de amostragem de 100 milisegundos), as variâncias do erro e do sinal de controle, o atraso médio e a variância do atraso τ_{sa} (calculados entre as amostras 1000 e 4000); os ensaios foram realizados com atrasos adicionais implementados com o *Buffer* 1.

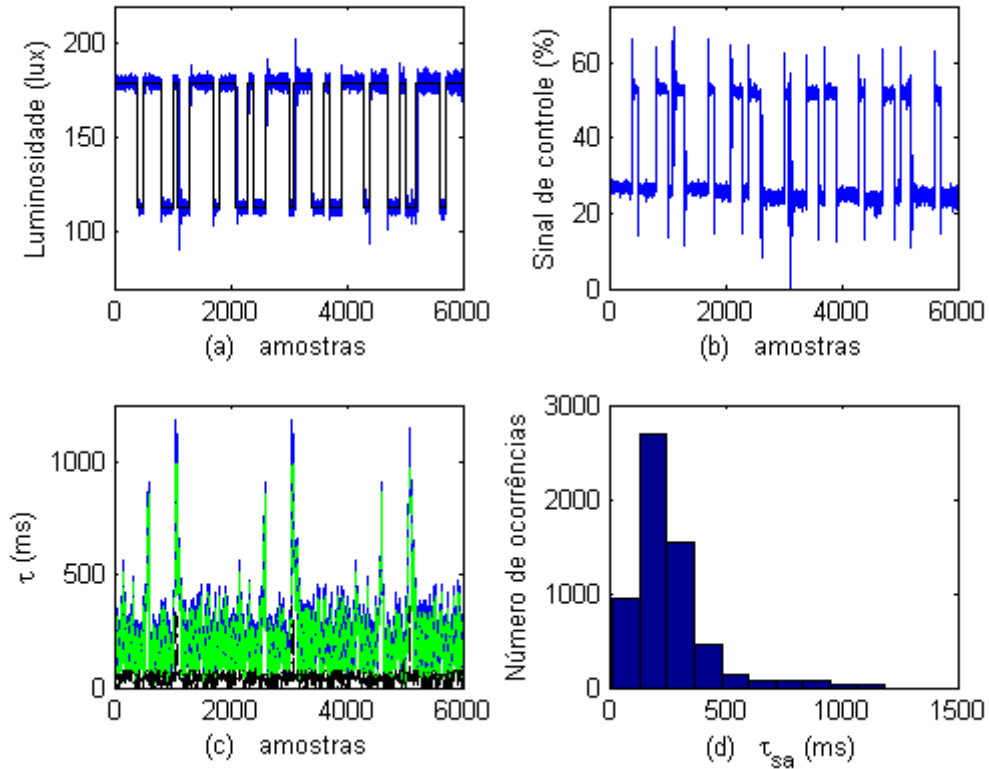


Figura 6.17: Ensaio 5, *Buffer* 1, PI+PS (τ_{sc}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

Pelos dados apresentados na Tabela 6.2 constata-se que os controladores acoplados com o Preditor de Smith e a Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle com o valor de $\gamma = 0$ (sem filtro) apresentaram menores variâncias do erro. Verifica-se que houve uma redução em torno de 37% na variância do erro com o uso do Preditor de Smith Adaptativo (com τ_{sc}) se comparado com o controlador PI.

Se compararmos os ensaios #2 a #4 em que foram utilizados a Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle, o ensaio #2 realizado com $\gamma=0$, ou seja, sem filtro apresentou menor variância do erro (vide Tabela 6.2); refletindo novamente a influência da constante de tempo do filtro. Uma análise mais detalhada de técnicas de filtragem com uso de filtros adaptativos seria interessante para agregar possíveis melhorias à esta estratégia de controle para aplicações em

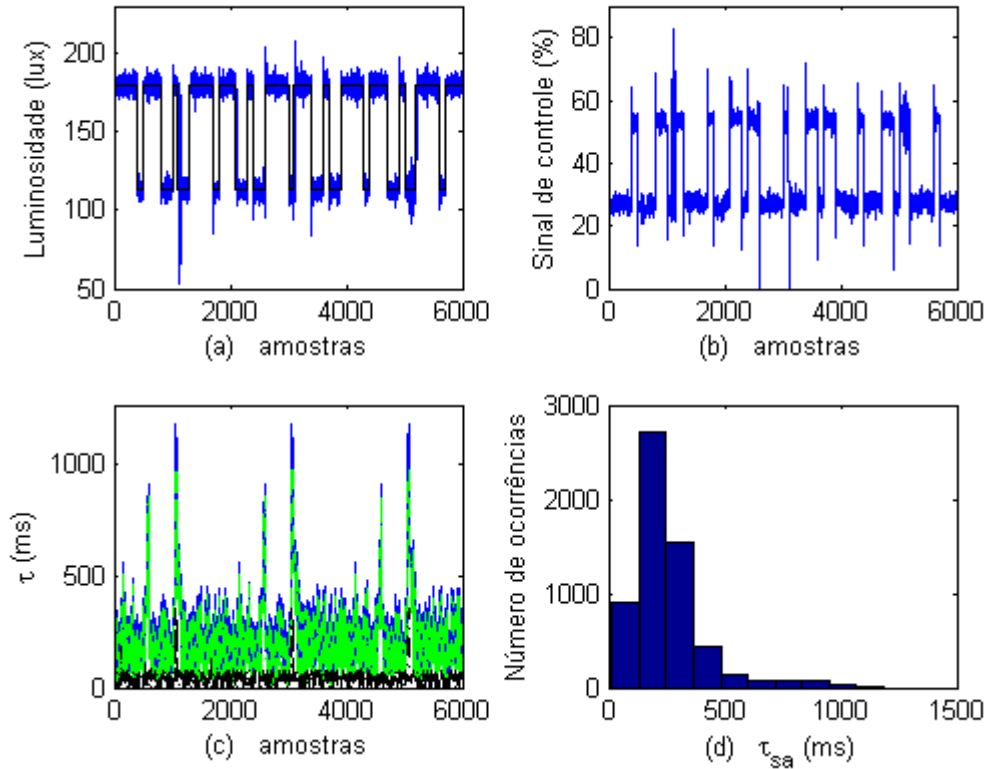


Figura 6.18: Ensaio 6, *Buffer* 1, PI+PS (τ_{ca}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

NCSs.

6.1.2.7 Ensaios com Atrasos Adicionais com Distribuição Exponencial

Atrasos adicionais com distribuição exponencial foram inseridos no *link* sensor-controlador. A Figura 6.21 ilustra o perfil de atrasos inseridos no *buffer* e o histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos.

6.1.2.8 Controlador PI - Atrasos Adicionais com Distribuição Exponencial

Embora oscilações de grandes amplitudes possam ser detectadas neste ensaio (Figura 6.22), o sistema permaneceu controlado, estável. Na Figura 6.22 (c),

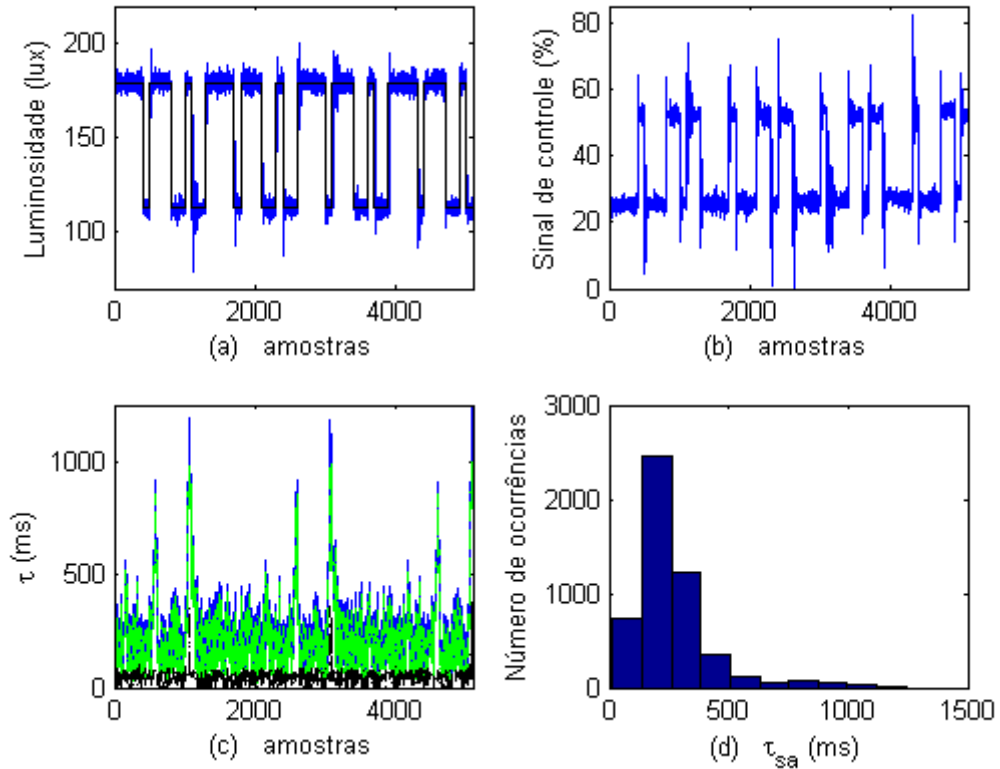


Figura 6.19: Ensaio 7, *Buffer* 1, PI+PS (τ_{sa}): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

nota-se a ocorrência de um atraso τ_{sa} de 1652ms (na amostra 1068), ou seja, superior a 16 períodos de amostragem. Entre as amostras 1074 e 1080, o atraso τ_{sa} se manteve num valor superior a 1300ms. Após a mudança de *setpoint* (que ocorre na amostra 1100), oscilações entre 3 e 207 lux são detectadas (esta variação corresponde a 180% do valor de referência fixado em 113 lux). Estas oscilações, de amplitudes maiores, são momentâneas (desaparecem após a amostra 1170), uma vez que os atrasos são variantes no tempo. Na Figura 6.22 (d) é ilustrado o histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} ; sendo que 99% dos atrasos são inferiores a 1200ms e o atraso médio igual a 603ms, ou seja, superior a 6 períodos de amostragem; mesmo com atraso médio superior ao limite obtido para atraso constante (igual a 469ms, vide Capítulo 5), o sistema permaneceu estável.

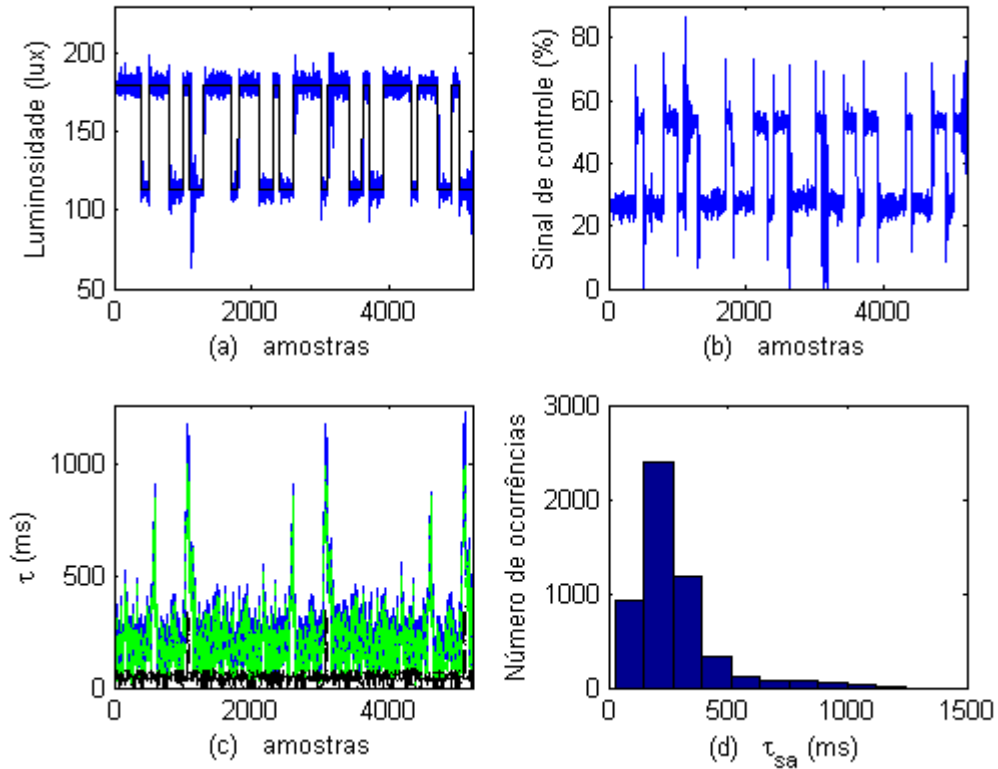


Figura 6.20: Ensaio 8, *Buffer* 1, PI+PS+CE (τ_{sc} e $\gamma=0.9$): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

6.1.2.9 Controlador PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle - Atrasos Adicionais com Distribuição Exponencial

Embora 1936ms seja o maior atraso registrado neste teste (Figura 6.23) com apenas uma ocorrência na amostra 1241, este não provocou oscilações de maiores amplitudes do ensaio, uma vez que, no período entre as amostras 1115 e 1160, as oscilações detectadas foram maiores (entre 2 e 214 lux). Este fato corrobora a tese de que o efeito dos atrasos depende da forma com que eles ocorrem e não apenas do seu valor máximo e também que um único atraso de valor mais elevado mas com baixa probabilidade de ocorrência pode não levar o sistema à instabilidade e nem mesmo deteriorar seu desempenho. Portanto, considerar apenas o atraso máximo como limite para projeto dos controladores, pode de fato, levar a resulta-

Tabela 6.2: Comparação dos Controladores na Malha de Luminosidade com *Buffer 1*

Ensaio #	Controlador	Nº de Amostras	Variância do Erro (lux^2)	Variância da MV ($\%^2$)	τ_{sa} Médio (ms)	Variância de τ_{sa} (ms^2)
1	PI	5000	187,8	175,8	265,6	$2,807 \times 10^4$
2	PI+CE $\gamma = 0$	5600	124,3	189,7	265,9	$2,840 \times 10^4$
3	PI+CE $\gamma = 0.9$	7800	165,7	194,9	271,5	$2,831 \times 10^4$
4	PI+CE $\gamma = 0.95$	4600	157,4	200,7	265,7	$2,841 \times 10^4$
5	PI+PS $\theta_m = \tau_{sc}$	6000	117,2	187,7	267,2	$2,836 \times 10^4$
6	PI+PS $\theta_m = \tau_{ca}$	6000	135,1	191,8	266,0	$2,818 \times 10^4$
7	PI+PS $\theta_m = \tau_{sa}$	5100	125,9	186,4	272,4	$2,863 \times 10^4$
8	PI+PS+CE $\gamma = 0.9$ $\theta_m = \tau_{sc}$	5200	134,4	190,0	271,0	$2,839 \times 10^4$

dos desnecessariamente conservadores daí a necessidade de se considerar os efeitos dos atrasos de forma probabilística e não determinística. É importante salientar que os atrasos em NCSs devem ser tratados de forma diferente do tratamento dado a sistemas com atrasos, uma vez que, quando um atraso elevado ocorre em um NCS, as mensagens são enfileiradas e estas acabam sendo processadas sequencialmente quase que instantaneamente em um intervalo muito pequeno de tempo (em alguns poucos milisegundos no caso da plataforma NCS-CMUF), ou seja, um atraso com valor elevado pode ser ‘recuperado’ rapidamente se o mesmo é seguido de atrasos pequenos. Dessa forma o atraso aumenta de 1 em 1 amostra e reduz quase que instantaneamente.

6.1.2.10 Controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo - Atrasos Adicionais com Distribuição Exponencial

As figuras 6.24 e 6.25 ilustram as respostas da planta e do controlador e as características dos atrasos medidos nos ensaios realizados usando o Preditor de

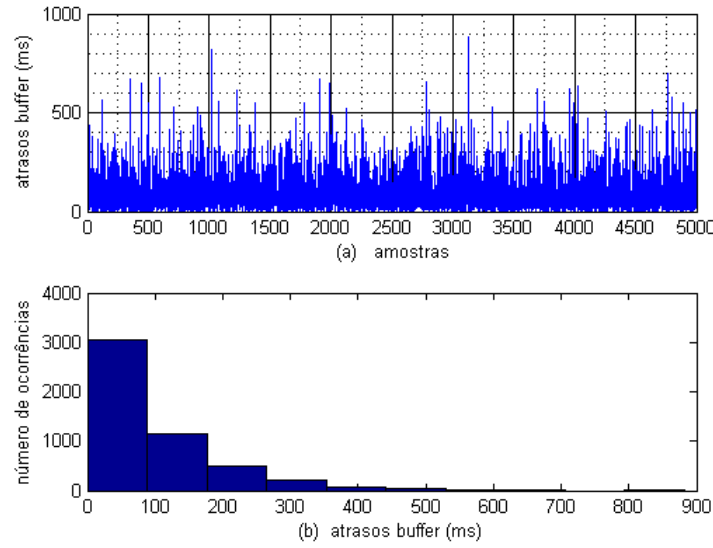


Figura 6.21: Atrasos no *Buffer 2* (a) atrasos (b) histograma com o número de ocorrências por faixa de atrasos.

Smith Adaptativo, com τ_{sc} e τ_{sa} , respectivamente, com o uso do *Buffer 2*.

Observa-se na Figura 6.24 (c) que em torno das amostras 1100 e 2600, os atrasos atingiram valores máximos semelhantes da ordem de 1500ms, entretanto, na Figura 6.24 (a) o comportamento observado na resposta temporal nestes 2 instantes foram bem diferentes, refletindo mais uma vez que, a forma com que os atrasos anteriores ocorreram e o tempo em que estes atrasos elevados permaneceram influenciam na resposta em malha fechada. Verifica-se nas figuras 6.24 e 6.25 (d) que as distribuições dos atrasos são bem diferentes da obtida no ensaio com controlador PI (vide Figura 6.22 (d)) o que dificulta uma análise comparativa. Vale destacar que para os ensaios realizados com atrasos maiores emulados através dos *buffers*, ocorreram a saturação da ação de controle em vários instantes o que não aconteceu nos ensaios realizados com os atrasos naturais da rede.

6.1.2.11 Comparação entre os Controladores nos Ensaios com Atrasos Adicionais com Distribuição Exponencial

A Tabela 6.3 apresenta uma comparação entre 4 ensaios realizados usando diferentes controladores e com os atrasos da Figura 6.21 inseridos no *buffer*; são

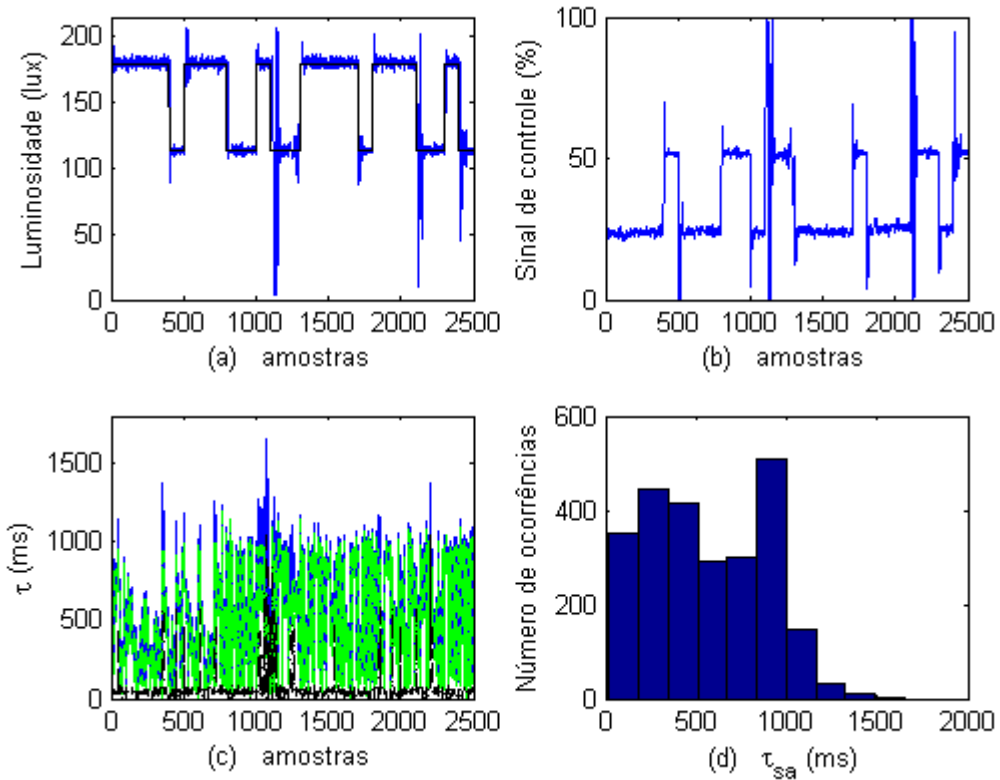


Figura 6.22: Ensaio 1, PI, *Buffer 2*: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

apresentados o tipo de controlador adotado, o número de amostras do ensaio, a variância do erro e do sinal de controle, o atraso τ_{sa} médio e a variância do atraso (os valores apresentados na Tabela 6.3 foram calculados entre as amostras 500 e 2500). O atraso máximo inserido no *Buffer 2* foi igual a 882ms, entretanto, uma relação τ_{max}/h superior a 19 foi alcançada em alguns instantes durante os ensaios na rede real.

Na Tabela 6.3, embora uma menor variância tenha sido obtida com os controladores com Preditor de Smith Adaptativo, como já dito, não é possível estabelecer uma comparação com o controlador PI, uma vez que, as características dos atrasos foram bem diferentes, como foi constatado pelo histograma por faixa de atrasos (figuras 6.22, 6.24 e 6.25 (d)) e também pode ser confirmado pelos atrasos médios indicados na Tabela 6.3.

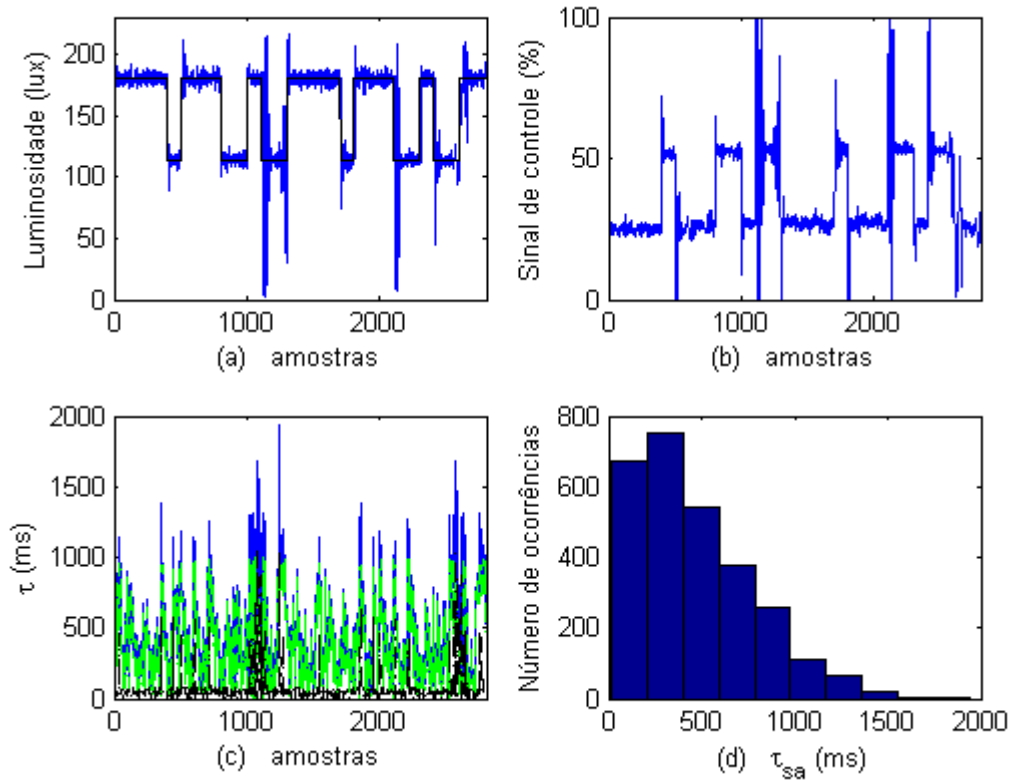


Figura 6.23: Ensaio 2, PI+CE, *Buffer 2*, $\gamma = 0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

Os ensaios com *Buffer 2* refletiram que atrasos máximos superiores a 19 períodos de amostragem e atrasos médios superiores ao limite obtido para atrasos constantes podem ser suportados por esta malha sem instabilizar.

6.1.3 Simulação da Malha de Luminosidade

Tendo em vista que não é possível garantir em diferentes ensaios reais que os atrasos sejam idênticos e que os estados do processo estejam nas mesmas condições, optou-se por fazer também uma simulação usando um único conjunto de atrasos medidos no sistema real, aplicado na entrada do modelo da malha de luminosidade para os diferentes tipos de controladores. O objetivo desta simulação é avaliar o desempenho de cada controlador diante dos mesmos atrasos na

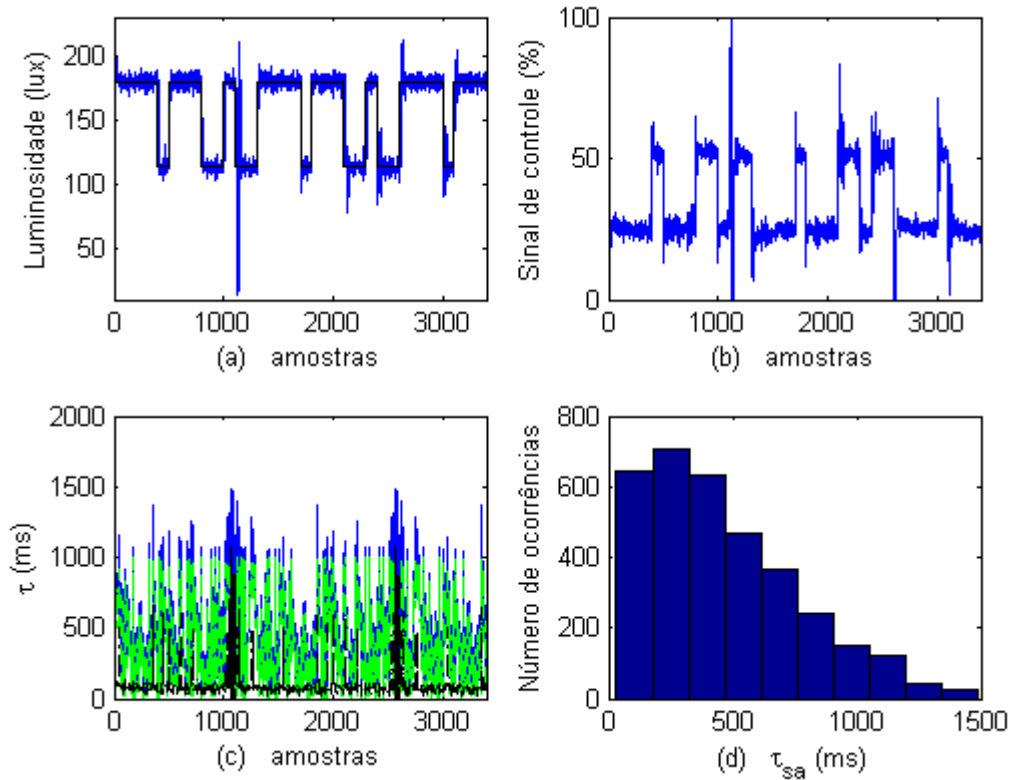


Figura 6.24: Ensaio 3, PI+PS, *Buffer* 2, τ_{sc} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

rede em uma condição ‘reproduzível’ e analisar os efeitos de um mesmo perfil de atrasos sob diferentes condições operacionais (por exemplo, variação de *setpoint*).

Na simulação da malha de luminosidade com os diferentes tipos de controladores utilizados nos experimentos apresentados na seção anterior, o conjunto de atrasos medidos no Ensaio 1 da Tabela 6.2 foi utilizado na entrada da planta, ou seja, considerado igual a τ_{ca} . A simulação foi realizada com 5000 amostras, conforme conjunto de atrasos medidos no referido ensaio, entretanto, só será apresentado o período entre as amostras 995 e 1250 para melhor visualização. O perfil de atrasos neste período é ilustrado na Figura 6.26, com um atraso máximo de 1184 ms, ou seja, superior a 11 amostragens do controlador.

As figuras 6.27 (a)-(f) ilustram as respostas da malha de luminosidade simulada com diferentes tipos de controladores superposta a saída da malha simulada

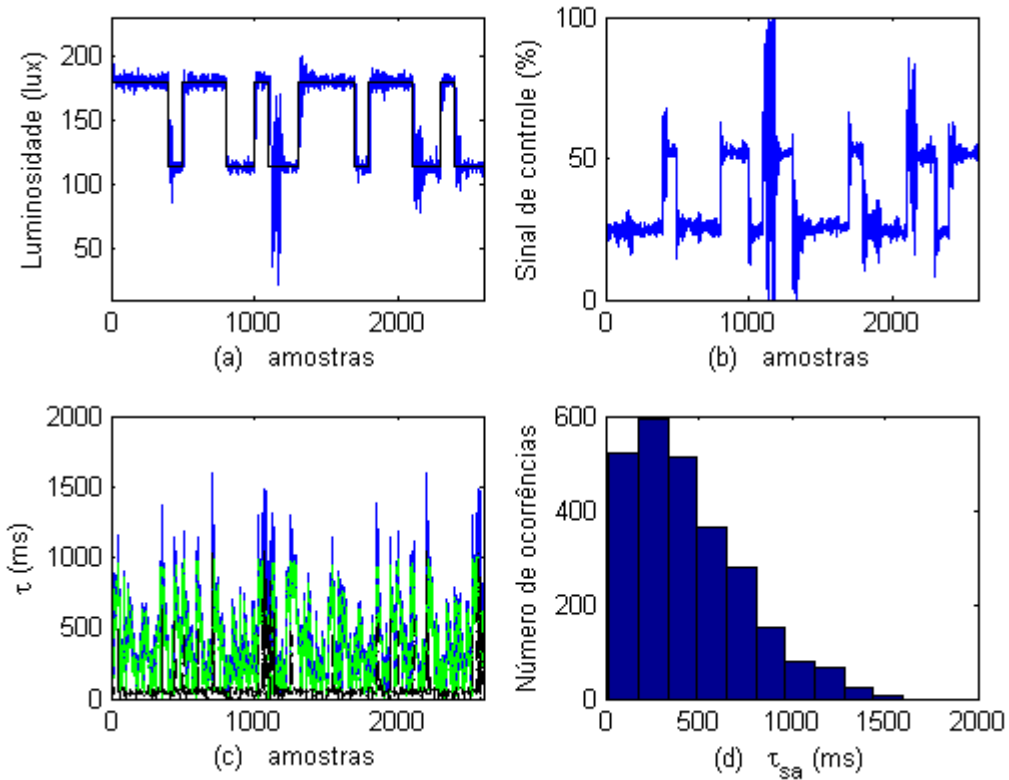


Figura 6.25: Ensaio 4, PI+PS, *Buffer* 2, τ_{sa} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

com o controlador PI para um *setpoint* fixo igual a 179,4 lux. Já a Figura 6.27 (b) mostra a resposta da malha com o Preditor de Smith (PI+PS) que utiliza o atraso do preditor adaptativo em função dos atrasos, ou seja, a média móvel dos atrasos com janela temporal igual a 10 amostras e, a Figura 6.27 (c) a resposta do PI com Preditor de Smith e Compensação Explícita do Sinal de Controle com $\gamma = 0.9$. Nas figuras 6.27 (d)-(f) as resposta do controlador PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle, com $\gamma = 0$, $\gamma = 0.9$ e $\gamma = 0.95$ respectivamente, são também ilustradas.

Na Figura 6.27 nota-se algumas oscilações de maiores amplitudes entre as amostras 1100 e 1150 para os controladores PI e PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle. Na Figura 6.27 (d) com o controlador PI+CE e $\gamma = 0$, por exemplo, observa-se oscilações entre 173 e 185 lux, ou seja, em torno de 7% do

Tabela 6.3: Comparação dos Controladores na Malha de Luminosidade com *Buffer 2*

Ensaio #	Controlador	Nº de Amostras	Variância do Erro (lux^2)	Variância da MV ($\%^2$)	τ_{sa} Médio (ms)	Variância de τ_{sa} (ms^2)
1	PI	2500	394,6	282,1	603,4	$1,036 \times 10^5$
2	PI+CE $\gamma = 0.9$	2800	468,5	302,2	443,7	$8,605 \times 10^4$
3	PI+PS $\theta_m = \tau_{sc}$	3400	277,4	210,3	456,5	$8,989 \times 10^4$
4	PI+PS $\theta_m = \tau_{sa}$	2600	241,1	236,0	438,7	$8,574 \times 10^4$

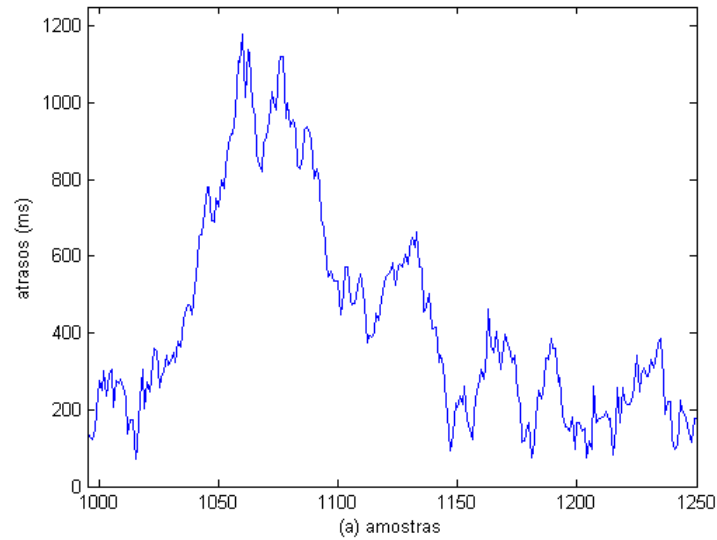


Figura 6.26: Atrasos reais medidos usados na simulação.

valor de referência.

Para avaliar os efeitos destes atrasos no comportamento da malha sob variação de *setpoint*, o sistema foi simulado com a referência do tipo PRBS conforme adotado nos experimentos. A Figura 6.28 (a) mostra a resposta real da malha de luminosidade com controlador PI obtida em um dos experimentos realizados superposta com a resposta simulada. As figura 6.28 (b)-(f) ilustram a resposta da malha de luminosidade simulada com diferentes tipos de controladores superposta a saída da malha simulada com o controlador PI. Os respectivos sinais de controle são apresentados na Figura 6.29.

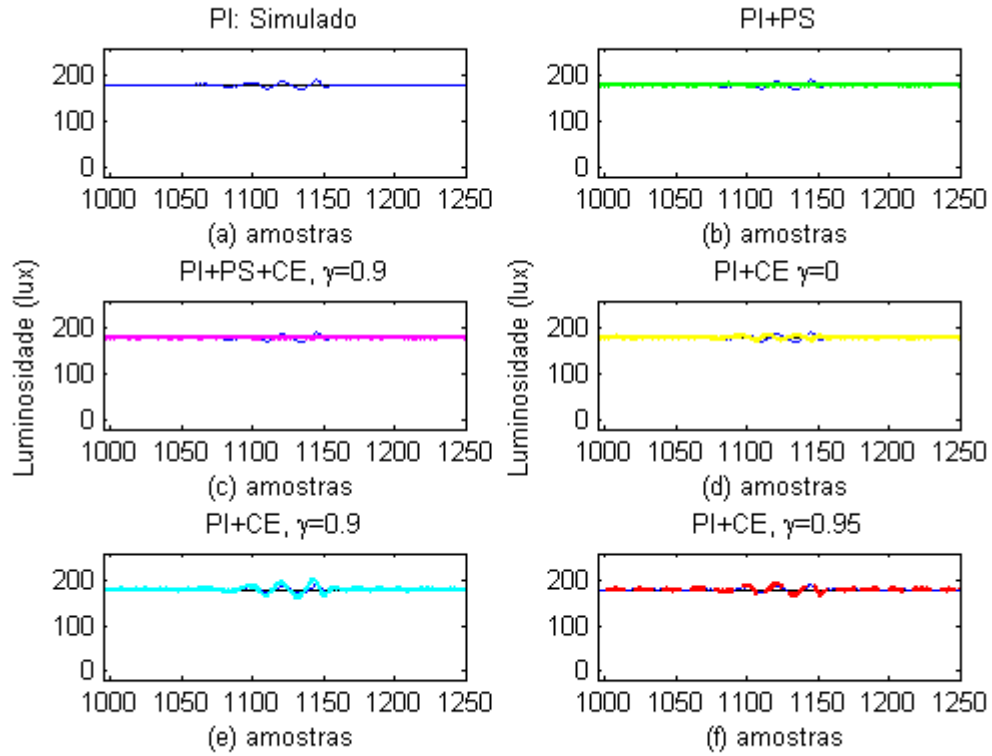


Figura 6.27: Saída da malha com uso do controlador: (a)-(f) PI simulada (linha azul); (b) PI+PS (linha contínua verde); (c) PI+PS+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua magenta); (d) PI+CE, $\gamma = 0$ (linha contínua amarela); (e) PI+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua cian) e (f) PI+CE, $\gamma = 0.95$ (linha tracejada vermelha).

Na Figura 6.28 logo após a mudança de *setpoint* que ocorre na amostra 1100, observa-se oscilações com amplitudes significativamente maiores se comparadas às detectadas na Figura 6.27 no ensaio com *setpoint* fixo. Por exemplo, na Figura 6.28 (d) com o controlador PI+CE e $\gamma = 0$, oscilações entre 59 e 175 lux foram detectadas entre as amostras 1100 e 1150, que corresponde a uma variação em torno de 100% do sinal de referência (igual a 113 lux). Isto reflete que os efeitos dos atrasos são mais pronunciados quando ocorre variações mais significativas na ação de controle.

Na Figura 6.28 confirma-se que os controladores com o uso do Preditor de Smith Adaptativo apresentaram melhor desempenho para a compensação dos efeitos dos atrasos conforme constatado também nos experimentos reais. Na Tabela 6.4 apresenta-se uma comparação da variância do erro calculada no período

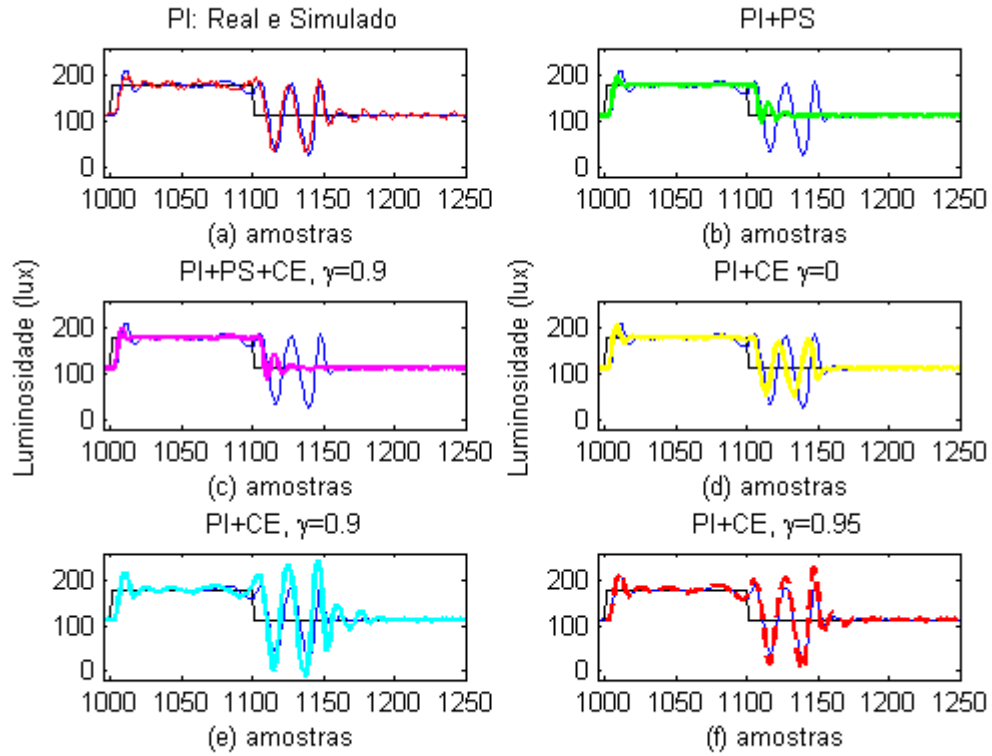


Figura 6.28: Saída da malha com uso do controlador: (a)-(f) PI simulada (linha azul); (a) PI real (linha contínua vermelha); (b) PI+PS (linha contínua verde); (c) PI+PS+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua magenta); (d) PI+CE, $\gamma = 0$ (linha contínua amarela); (e) PI+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua cian) e (f) PI+CE, $\gamma = 0.95$ (linha tracejada vermelha).

entre as amostras 995 e 1250, o que confirma a menor variância com o uso do Preditor de Smith Adaptativo e também o efeito da influência do filtro na Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle sob as mesmas condições de atraso.

6.1.4 Considerações sobre a Malha de Luminosidade

Esta gama de resultados experimentais na malha de luminosidade confirma a importância de se utilizar ferramentas que considerem as estatísticas dos atrasos para análise de NCSs, uma vez que, se for considerado de forma determinística apenas o atraso máximo como limite para projeto dos controladores, pode de fato levar a resultados desnecessariamente conservadores. O uso de Preditores de

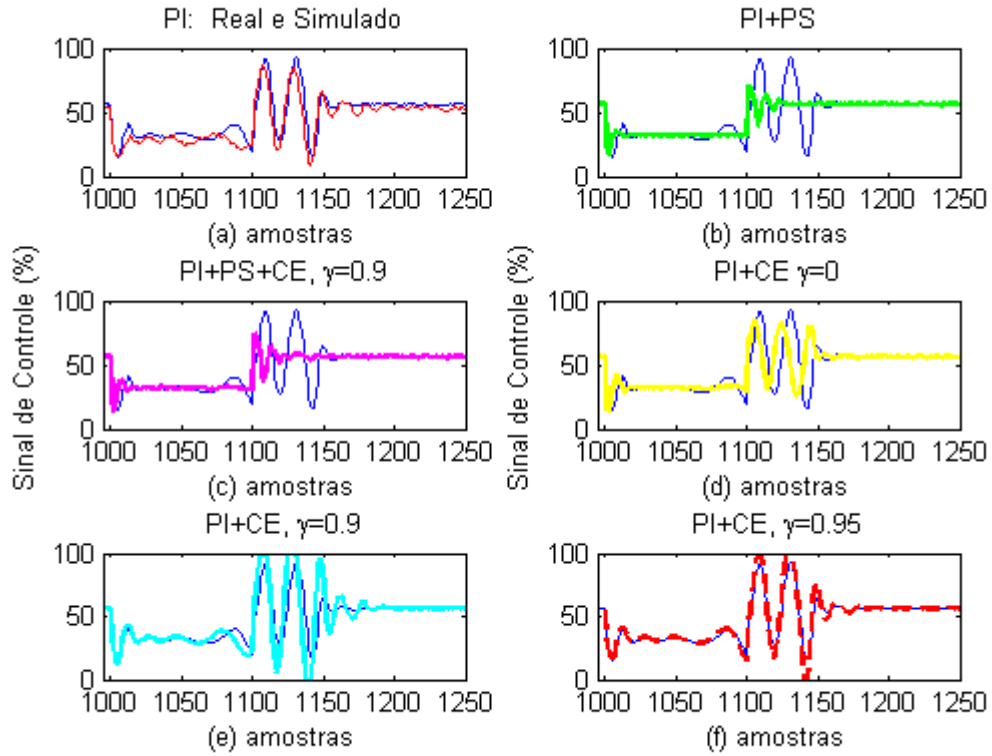


Figura 6.29: Sinal de controle com uso do controlador: (a)-(f) PI simulada (linha azul); (a) PI real (linha contínua vermelha); (b) PI+PS (linha contínua verde); (c) PI+PS+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua magenta); (d) PI+CE, $\gamma = 0$ (linha contínua amarela); (e) PI+CE, $\gamma = 0.9$ (linha contínua cian) e (f) PI+CE, $\gamma = 0.95$ (linha tracejada vermelha).

Smith Adaptativos mostrou-se uma boa alternativa para compensação dos efeitos dos atrasos, fato que foi confirmado tanto nos experimentos reais quanto na simulação apresentada com as mesmas condições de atrasos. A estratégia de compensação explícita é uma alternativa interessante para aplicações em plataformas em que as mensagens não possuem estampas de tempo, entretanto, a influência do filtro adotado deve ser melhor investigada.

6.2 Malha de Temperatura do Forno

Na seção 6.1 foi analisado o comportamento de um NCS aplicado à uma malha com constante de tempo da ordem de milissegundos representada por um modelo

Tabela 6.4: Simulação dos Controladores na Malha de Luminosidade

Ensaio Figura 6.27	Controlador	Variância do Erro (lux^2)
(a)	PI Real	728,3
(a)-(f)	PI Simulado	712,5
(b)	PI+PS	192,4
(c)	PI+PS+CE ($\gamma = 0.9$)	203,9
(d)	PI+CE ($\gamma = 0$)	405,9
(e)	PI+CE ($\gamma = 0.9$)	1618
(f)	PI+CE ($\gamma = 0.95$)	1160

linear de segunda ordem com atraso puro de tempo. Nos experimentos desta seção foi utilizada uma malha de temperatura (de um forno elétrico) com constante de tempo da ordem de segundos, sem atraso puro de tempo (perceptível) e um comportamento bilinear, dada a diferença na dinâmica de aquecimento (forçado) e resfriamento (natural). Ressalta-se a importância de se utilizar plantas com diferentes características dinâmicas para uma análise mais abrangente e permitir a obtenção conclusões mais consolidadas.

Para os ensaios realizados com a malha de temperatura do forno, a estação de controle remoto foi instalada fisicamente no CPEI/CEFET-MG (configurado com um IP fixo da rede 200.131.xx.xx) e o Servidor CMUF (vide Figura 3.2) foi instalado no LCPI/UFGM (configurado com um IP fixo da rede 150.164.xx.xx). Inicialmente são apresentados os ensaios realizados com os atrasos naturais da rede; em seguida são mostrados alguns ensaios realizados com o *buffer* artificialmente inserido para aumentar os atrasos.

6.2.1 Ensaios com Atrasos Naturais da Rede

O comportamento do NCS com a malha de temperatura sujeito aos atrasos naturais da rede, com as estações local/remota distanciadas fisicamente mais de 10km entre si, serão avaliados. A resposta da malha e do controlador em cada ensaio, bem como a variação dos atrasos são apresentadas a seguir. Os seguintes esquemas de controle foram implementados, testados e avaliados: PI, PI+PS,

PI+CE, PI+PS+CE; usando como referência um sinal do tipo PRBS e o período de amostragem igual a 1 segundo.

6.2.1.1 Controlador PI

A saída da malha e do controlador para a malha de temperatura com o controlador PI, bem como as características dos atrasos medidos na rede são ilustradas na Figura 6.30. Na Figura 6.30 (a), o efeito da bilinearidade da malha é claramente perceptível. Embora tenha sido modelada apenas a dinâmica de aquecimento, a resposta consegue seguir bem a referência, porém, com maior sobresinal e tempo de acomodação no resfriamento, como já esperado, dado o resfriamento natural. Atrasos na rede real superiores a duas amostragens podem ser observados na Figura 6.30 (c), entretanto, estes não produzem efeitos tão significativos na malha fechada se comparado aos demais atrasos observados. Neste ensaio, a maioria dos atrasos (98%) foram inferiores a 260ms, sendo o atraso médio igual a 49ms.

6.2.1.2 Controlador PI com Compensação Explícita do Sinal de Controle

Nos ensaios realizados na malha de temperatura com controlador PI com compensação explícita do sinal de controle realizados para diferentes valores de γ ($\gamma=0$, $\gamma=0.9$ e $\gamma=0.95$, ilustrados nas figuras 6.31 a 6.33, respectivamente); os atrasos naturais da rede atingiram até 6 segundos em alguns instantes (ver Figura 6.32 (c)), ou seja, uma relação τ_{max}/h igual a 6.

Pelo perfil de variação dos atrasos (como ilustrado, por exemplo, na Figura 6.31 (c)), pode-se observar que o atraso médio (ou, seja a média móvel dos atrasos) varia ao longo do ensaio, conforme detalhe mostrado em escala ampliada para o atraso τ_{sa} na Figura 6.34. Entretanto, visualmente não é possível se perceber grandes diferenças no comportamento da resposta em malha fechada com os atrasos naturais da rede. Mesmo com a ocorrência de atrasos de 6 períodos de amostragem (Figura 6.32 (c)) a malha permanece bem estável sem efeitos pronun-

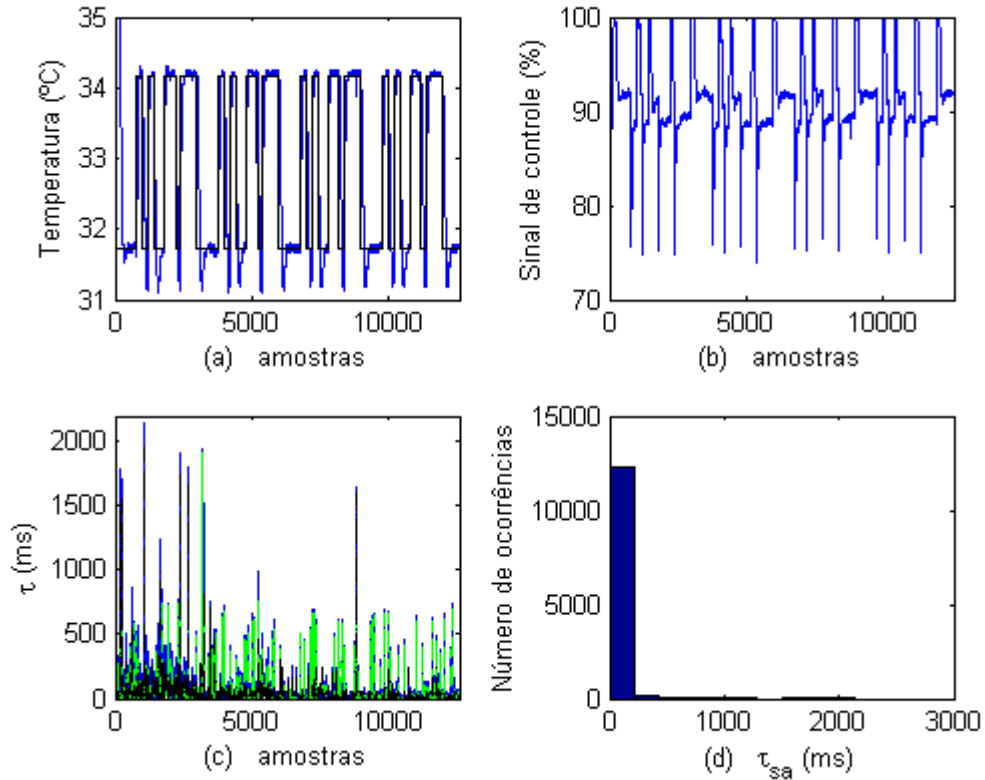


Figura 6.30: Ensaio 1, PI: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}

ciados. Na subseção 6.2.1.5 é realizada uma análise comparativa entre os ensaios realizados com os diferentes tipos de controladores apresentando alguns índices de desempenho tais como a variância do erro.

6.2.1.3 Controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo

Nos testes realizados com o controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo com τ_{sc} e τ_{sa} (figuras 6.35 e 6.36), assim como nos demais ensaios com a planta térmica, observa-se que ocorre a saturação do sinal de controle em seu limite superior (100%, que corresponde ao desligamento da lâmpada) quando o *setpoint* é reduzido, ou seja, no resfriamento. Devido à estratégia *anti-windup* implementada nos controladores, a ação integral é limitada quando ocorre a saturação. Na Figura 6.36 (c) observa-se visualmente uma menor variância dos atrasos

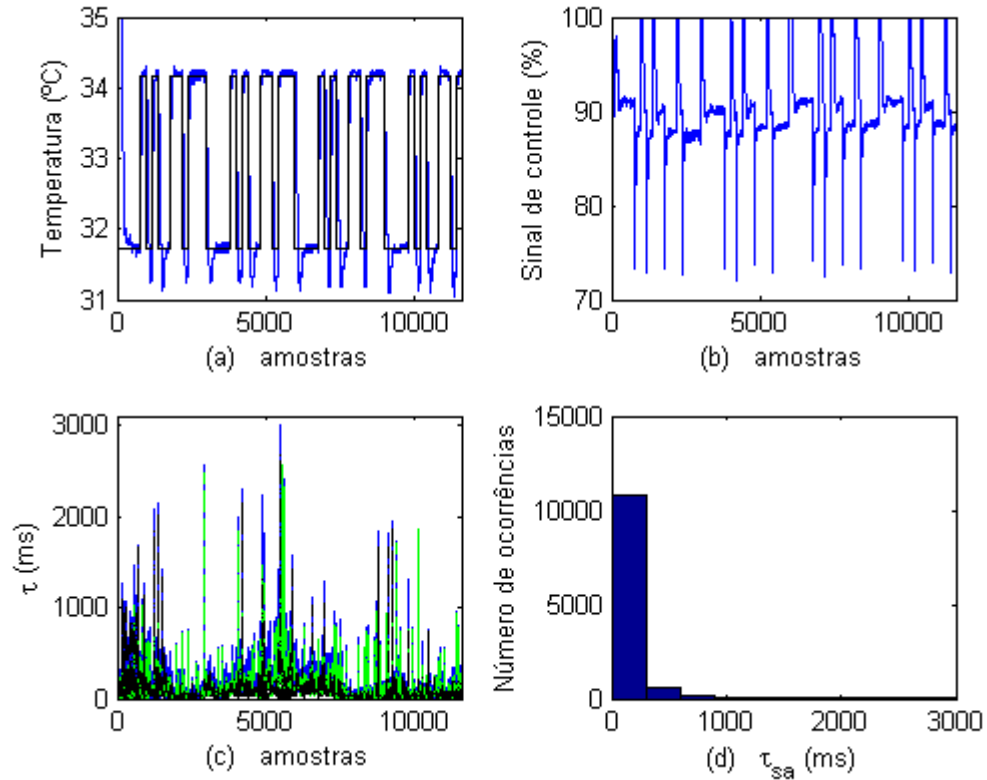


Figura 6.31: Ensaio 2, PI+CE, $\gamma = 0$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}

se comparada à Figura 6.35 (c); entretanto, as respostas de saída da malha são similares. A Figura 6.35 (a) mostra a saída da malha controlada por mais de 4 horas (15500 amostras) refletindo que o NCS, com os atrasos naturais da rede com as estações locais e remotas distanciadas mais de 10km entre si, permanece estável seguindo bem a referência.

6.2.1.4 Controlador PI com Preditor de Smith e Compensação Explícita do Sinal de Controle

Embora o controlador PI com Preditor de Smith Adaptativo acoplado com a Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle não tenha trazido melhorias para a malha de luminosidade, optou-se também por implementá-lo na malha de temperatura para verificar se o resultado obtido foi um caso particular

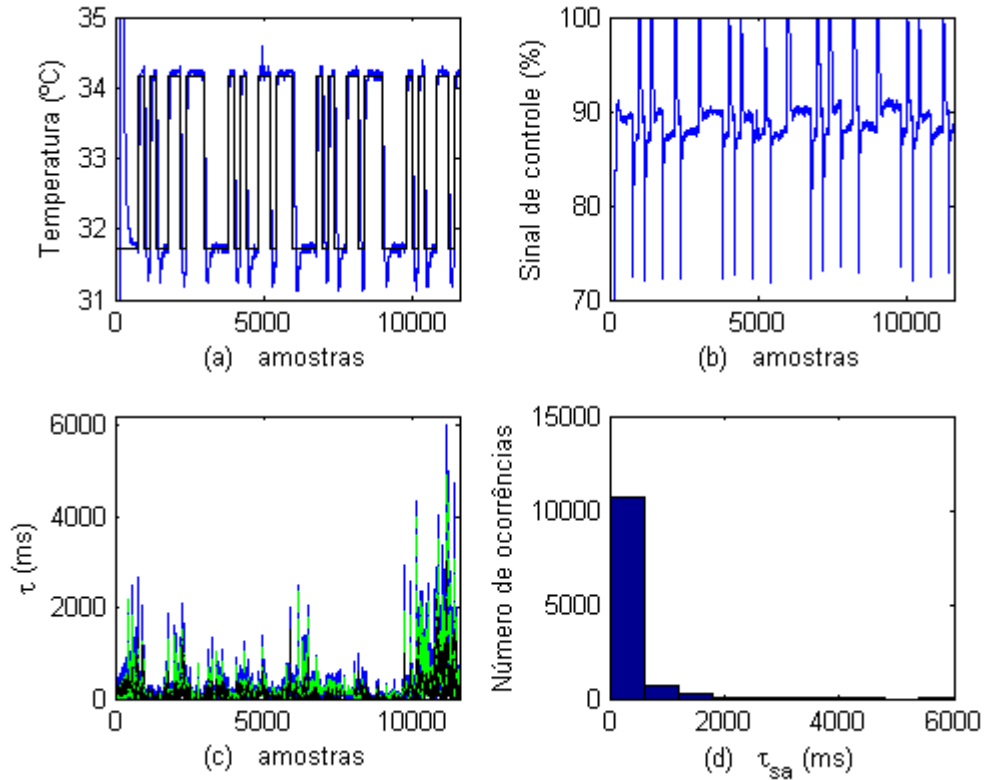


Figura 6.32: Ensaio 3, PI+CE, $\gamma = 0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

da malha avaliada ou se, de fato, esta estratégia não agrega melhorias mesmo em condições de redes e processos distintos. A Figura 6.37 ilustra as saídas da malha e do controlador e as características dos atrasos obtidas no ensaio com o controlador PI+PS+CE para a planta térmica. Pela inspeção visual da saída da malha (Figura 6.37 (a)) também não é possível constatar nenhuma melhoria significativa se comparada com o uso apenas do Preditor de Smith Adaptativo para a planta térmica. Uma análise quantitativa baseada na variância do erro em cada ensaio é apresentada a seguir.

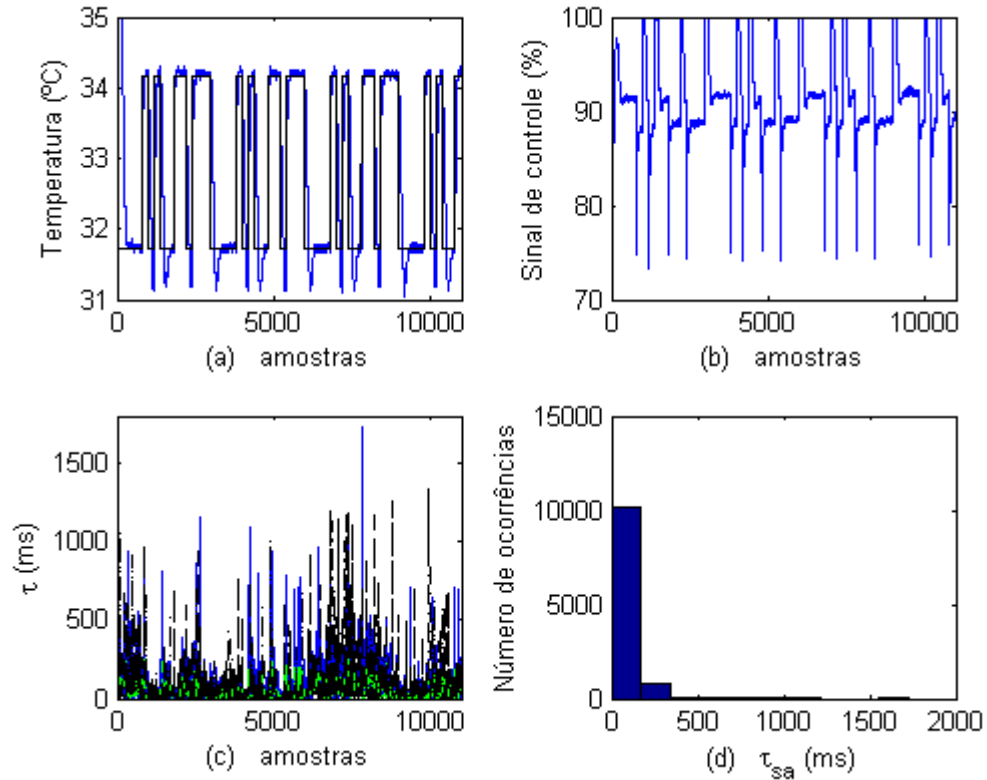


Figura 6.33: Ensaio 4, PI+CE, $\gamma = 0.95$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}

6.2.1.5 Comparação entre os Controladores nos Ensaios com Atrasos Naturais da Rede

A Tabela 6.5 apresenta, de forma comparativa, as características e condições dos vários controladores implementados; nesta constam: o tipo de controlador adotado, o número de amostras do ensaio, a variância do erro e do sinal de controle, o atraso τ_{sa} médio e a variância do atraso total (calculados entre as amostras 1000 e 10000) obtidos nos ensaios realizados na malha de temperatura.

Nos dados apresentados na Tabela 6.5, embora constata-se menores variâncias do erro com a utilização dos controladores com Preditor de Smith Adaptativo e atraso τ_{sa} e com compensação explícita do sinal de controle com $\gamma = 0.9$, ressalta-se que, em todos os ensaios, os atrasos médios da rede foram muito

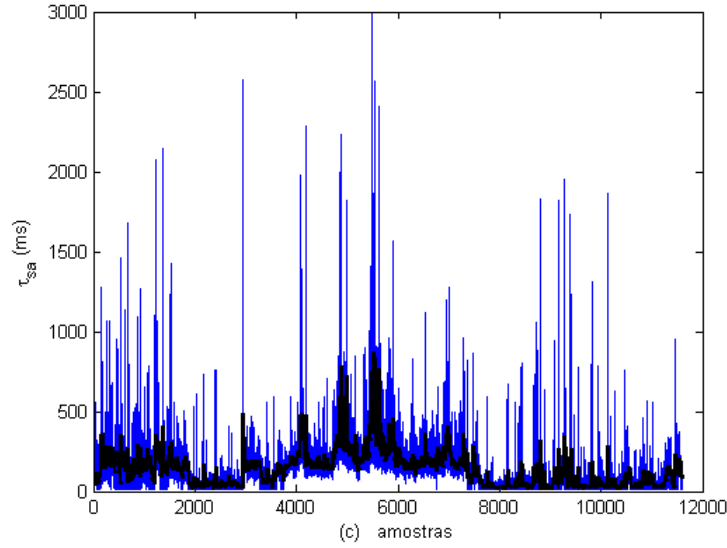


Figura 6.34: Atrasos τ_{sa} (linha contínua em azul) e sua média móvel (linha contínua em preto) com uma janela temporal de 10 amostras.

menores que um período de amostragem. Em alguns ensaios (por exemplo, Figura 6.37 (c)) o atraso máximo chegou a atingir 6 períodos de amostragem, mas estes atrasos naturais da rede não tiveram efeitos pronunciados na resposta de saída da malha. Portanto, para se chegar a condições em que os efeitos dos atrasos fossem mais expressivos, optou-se também por emular atrasos adicionais na rede por meio de um *buffer* como será apresentado na seção a seguir.

6.2.2 Ensaios com Atrasos Adicionais Emulados

Ensaios foram realizados introduzindo atrasos adicionais na saída do controlador remoto, ou seja, no *link* entre controlador e atuador emulando τ_{ca} , diferentemente da malha de luminosidade em que o *buffer* foi inserido no *link* entre sensor e controlador de forma a emular τ_{sc} . O perfil dos atrasos introduzidos no *buffer* é apresentado na Figura 6.38 (a) e na Figura é mostrado 6.38 (b) o histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos. Os valores dos atrasos máximo e médio são respectivamente iguais a 8460ms e 129ms.

Visando uma análise em diferentes condições de operação, os ensaios com *buffer* de atrasos na malha de temperatura foram realizados usando o controlador

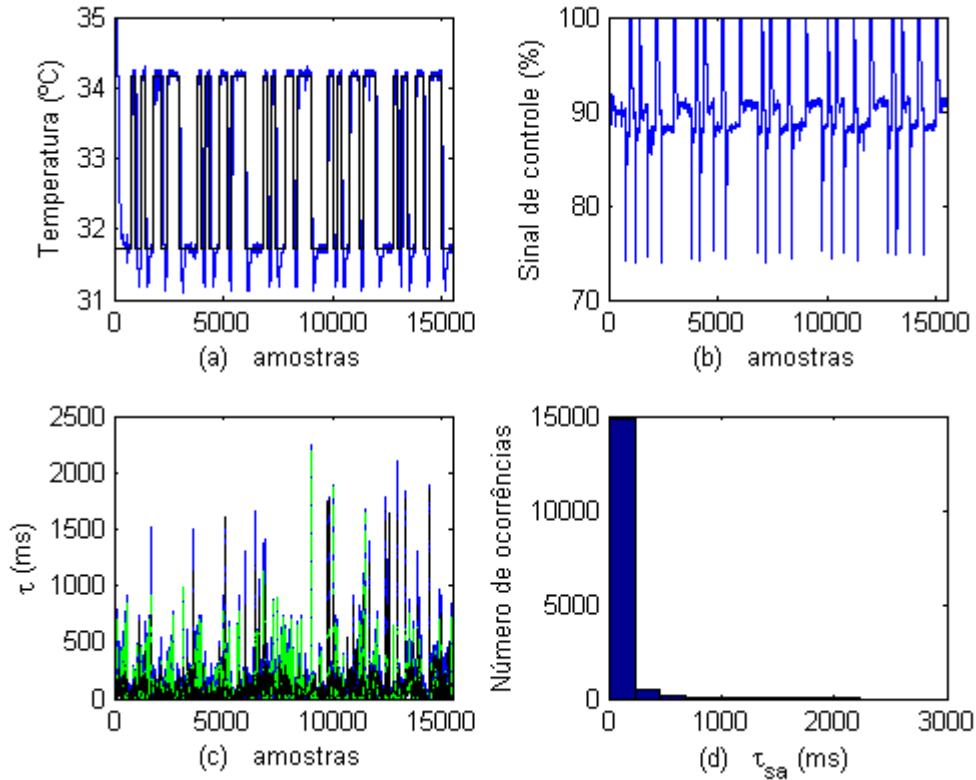


Figura 6.35: Ensaio 5, PI+PS, τ_{sc} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

PI com diferentes *setpoints*, inserção de um ruído adicional na medida e para uma diferente sintonia do controlador. A Figura 6.39 ilustra a saída da malha e do controlador e as características dos atrasos medidos em um NCS com a malha de temperatura e referência do tipo PRBS, com atrasos adicionais emulador por meio do *buffer* de atrasos e sem adição de ruído na medida. Na Figura 6.39 (c) o atraso máximo foi igual 8584ms, ou seja, superior a 8 períodos de amostragem e a planta permanece estável.

Para avaliar o comportamento da malha de temperatura sob uma variação mais suave da referência, realizaram-se dois ensaios com referência senoidal apresentados nas figuras 6.40 e 6.41. Na Figura 6.40 a referência senoidal gerada (dada por $r(k) = 50 * \sin(0,01k + 1) + 350$, sendo $r(k)$ a referência no instante k) possui frequência igual a 0,01rad/s e na Figura 6.41 a referência (dada por

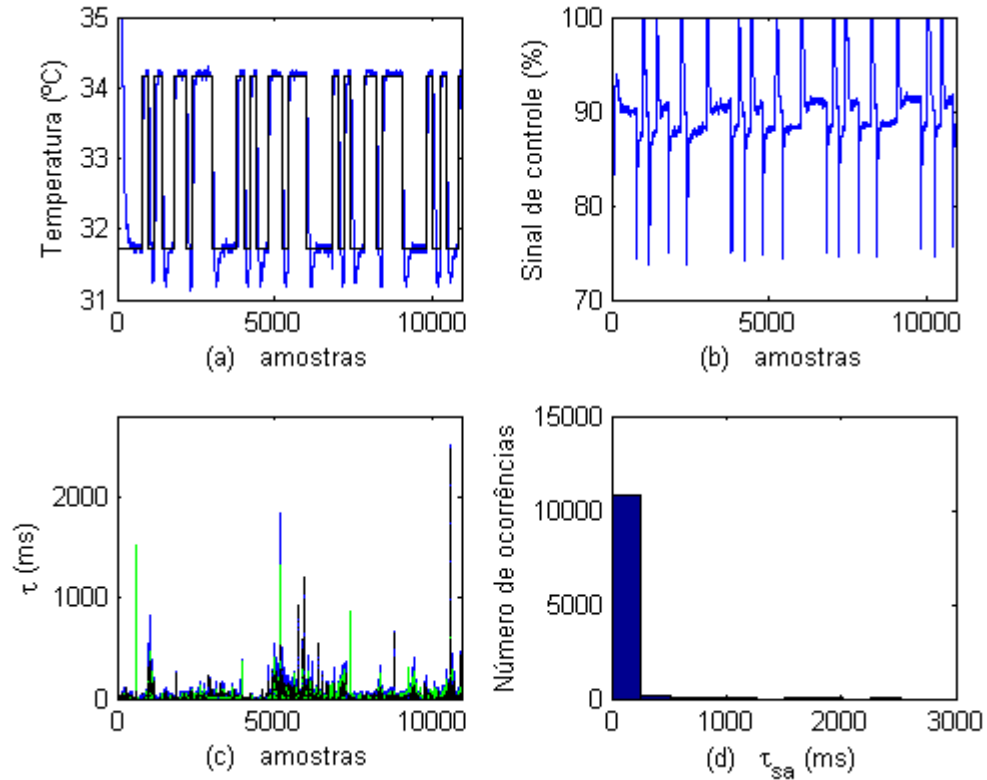


Figura 6.36: Ensaio 6, PI+PS, τ_{sa} : (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

$r(k) = 50 * \text{sen}(0,02k + 1) + 350$ foi gerada com frequência de 0,02rad/s. Na Figura 6.40 constata-se que, a saída da malha segue a referência, mesmo sujeito a atrasos superiores a 8 amostras, não sendo possível perceber alterações significativas na resposta da saída da malha que possam ser atribuídas às variações de atrasos. Já na Figura 6.41 (a) com um aumento da frequência da senoide de referência, é possível observar melhor o deslocamento entre a referência e a saída da malha devido ao atraso.

O comportamento do NCS em malha fechada com uma referência do tipo onda triangular também foi avaliado; as saídas da planta e do controlador e as características dos atrasos medidos são ilustradas na Figura 6.42. Constata-se também que, para esta malha, mesmo com as variações bruscas na referência impostas nos vértices da onda triangular, o sistema continua sob controle e sem

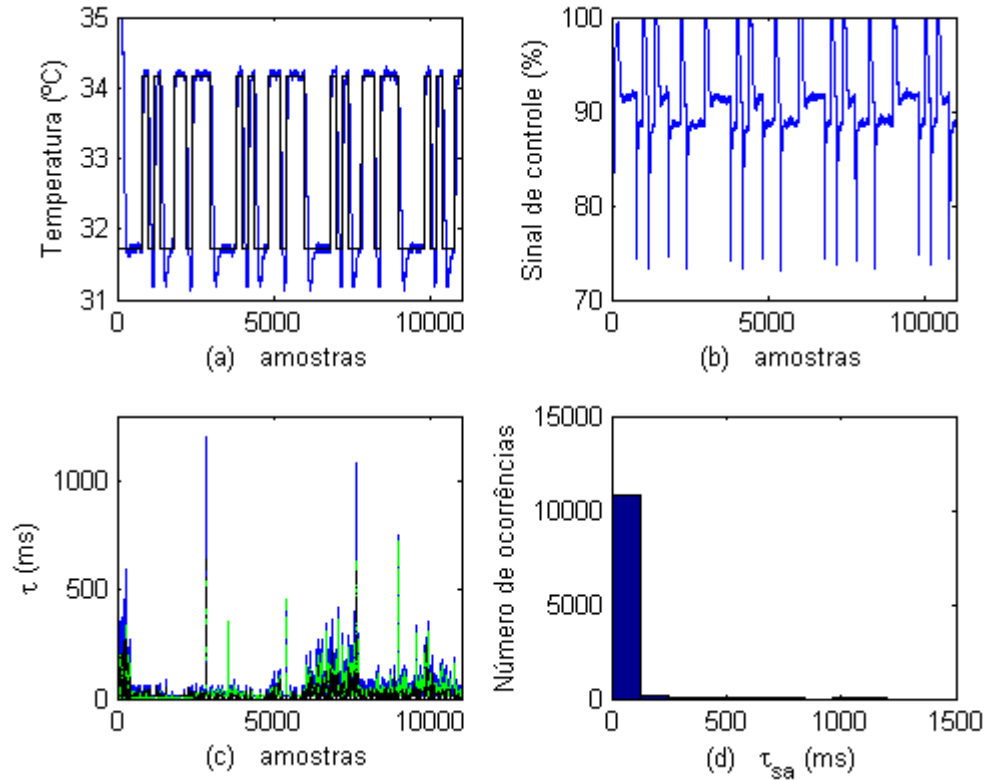


Figura 6.37: Ensaio 7, PI+PS+CE, τ_{sc} , $\gamma = 0.9$: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}

instabilidade ou grandes oscilações.

Como o nível de ruído observado na planta real foi pequeno, decidiu-se por incluir um ruído adicional na variável medida da saída da malha para se fazer uma avaliação dos efeitos dos atrasos na malha sob uma condição de ruído maior. À saída da malha foi adicionado um ruído em torno de $\pm 20\%$ da variação do degrau de referência, cujo perfil de variação e o histograma com número de ocorrências é ilustrado na Figura 6.43.

A Figura 6.44 ilustra as saídas da malha e do controlador e as características dos atrasos para a malha de temperatura com controlador PI e com ruído adicionado. A malha permanece sob controle e não é possível perceber visualmente oscilações significativas na variável de saída da malha (Figura 6.44 (a)) que se relacione aos efeitos de variações dos atrasos, mesmo na presença de ruído.

Tabela 6.5: Comparação dos Controladores na Malha de Temperatura

Ensaio #	Controlador	Nº de Amostras	Variância do Erro ($^{\circ}C^2$)	Variância da MV ($\%^2$)	τ_{sa} Médio (ms)	Variância de τ_{sa} (ms^2)
1	PI	12600	0,398	17,05	49,36	$8,316 \times 10^3$
2	PI+CE $\gamma = 0$	11600	0,344	16,59	139,8	$3,031 \times 10^4$
3	PI+CE $\gamma = 0.9$	11600	0,302	14,83	129,1	$3,668 \times 10^4$
4	PI+CE $\gamma = 0.95$	11000	0,408	17,90	63,64	$6,263 \times 10^3$
5	PI+PS $\theta_m = \tau_{sc}$	15500	0,342	15,55	61,61	$1,168 \times 10^4$
6	PI+PS $\theta_m = \tau_{sa}$	10900	0,329	15,05	33,23	$3,994 \times 10^3$
7	PI+PS+CE $\gamma = 0.9$ $\theta_m = \tau_{sc}$	11000	0,375	16,55	31,47	$1,532 \times 10^3$

Para se chegar a condições em que os atrasos fossem mais pronunciados, optou-se por fazer um ensaio com a dinâmica da malha fechada acelerada. A Figura 6.45 ilustra as saídas da planta e do controlador e as características dos atrasos para a malha fechada com o controlador PI usando uma nova sintonia (aqui denominada de Sintonia 2) em que a dinâmica de malha fechada desejada foi acelerada, considerou-se $\tau_d = 5s$, ou seja, 3 vezes mais rápida que a do projeto original. Na Figura 6.45 (a) em torno da amostra 932 observa-se uma maior amplitude nas oscilações. Para uma melhor avaliação, este trecho é mostrado em escala ampliada juntamente com os atrasos e o ruído adicionado na Figura 6.46.

Na Figura 6.46, constata-se que, na amostra 932 o valor da saída da malha atinge o seu valor máximo igual a $35,82^{\circ}C$ (sendo a referência igual a $34,16^{\circ}C$). A oscilação de maior amplitude pode ser justificada pelo significativo nível de ruído adicionado que ocorreu concomitantemente com um atraso de quase 5 períodos de amostragem, em torno da amostra 927 (5 amostras anteriores). Na amostra 927, o ruído adicionado foi igual $-0,83^{\circ}C$ (33% da variação do degrau de referência) e o atraso τ_{sa} igual a 4670ms. Embora a maior oscilação tenha sido detectada na amostra 932, o maior atraso (em torno de 8 períodos de amostragem) ocorreu na

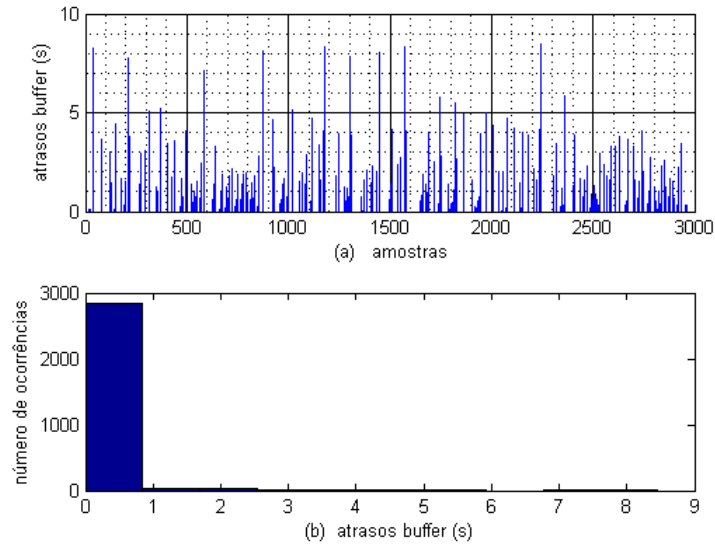


Figura 6.38: Atrasos no *Buffer* (a) atrasos (b) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos.

amostra 875, mas como neste instante o nível de ruído foi menor este valor de atraso não refletiu em grandes oscilações.

6.2.2.1 Considerações sobre a Malha de Temperatura

Controlou-se uma planta com característica bilinear e saturação no atuador. O NCS se manteve sob controle por longos períodos (várias horas) diante dos atrasos naturais da rede que atingiram até 6 períodos de amostragem. Mesmo em condições artificialmente construídas que tendem a ‘piorar’ a qualidade do controle, como a inserção de níveis de ruído mais elevados e atrasos adicionais no elo de realimentação (superiores a 8 períodos de amostragem), foi possível manter a malha sob controle, estável.

Os bons resultados obtidos nos diversos experimentos realizados na malha de temperatura na rede real, com controlador remoto e servidor distantes entre si por mais de 10km, permitem concluir que os esquemas de controle implementados são viáveis e refletem também a viabilidade da plataforma NCS-CMUF para implementações reais de sistemas de controle em rede.

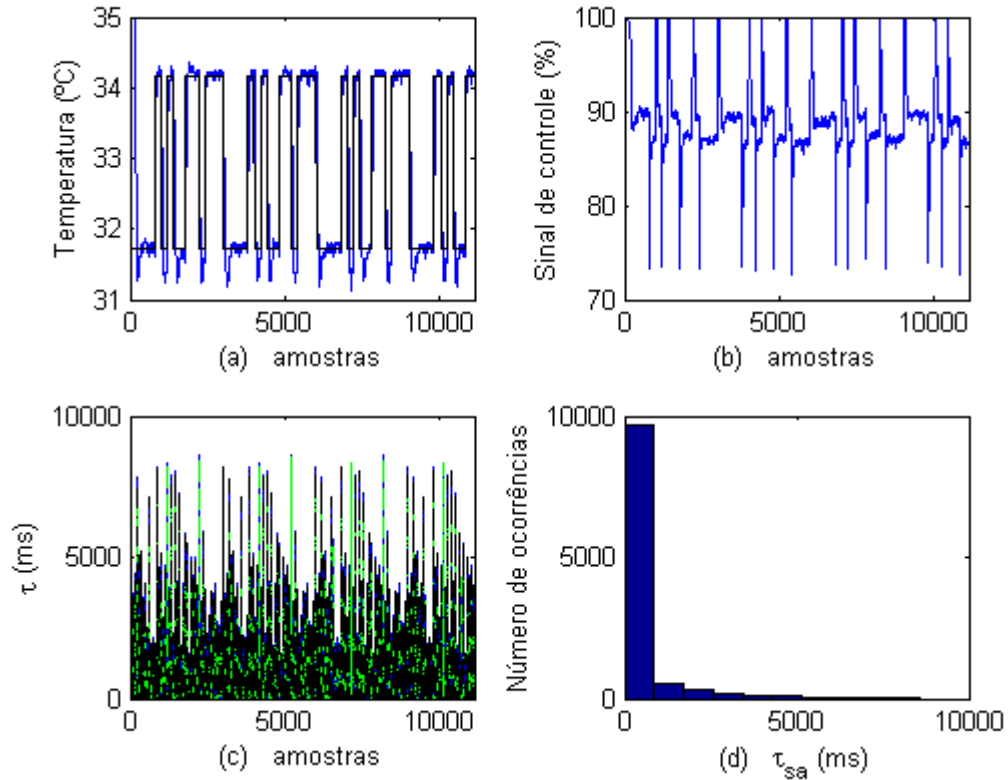


Figura 6.39: Ensaio 1, PI, *Buffer*, referência PRBS: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

6.3 Malha de Temperatura de uma Câmara de Refrigeração

Foram realizados testes com implantação de um NCS real em uma câmara de refrigeração que, conforme descrito no Capítulo 4, está instalada no CPEI/CEFET-MG com o controlador localizado em uma unidade remota na UFMG (distanciados um do outro mais de 10km, vide Figura 3.2). O objetivo dos estudos e resultados aqui apresentados é mostrar a aplicabilidade das ferramentas de controle em rede desenvolvidas em um sistema com restrições típicas de uma unidade de refrigeração comercial. Problemas de controle de sistemas de refrigeração são conhecidamente desafiadores dada a multiplicidade de fatores limitantes (como, por exemplo, a necessidade de espera de tempo para religamento e a resposta

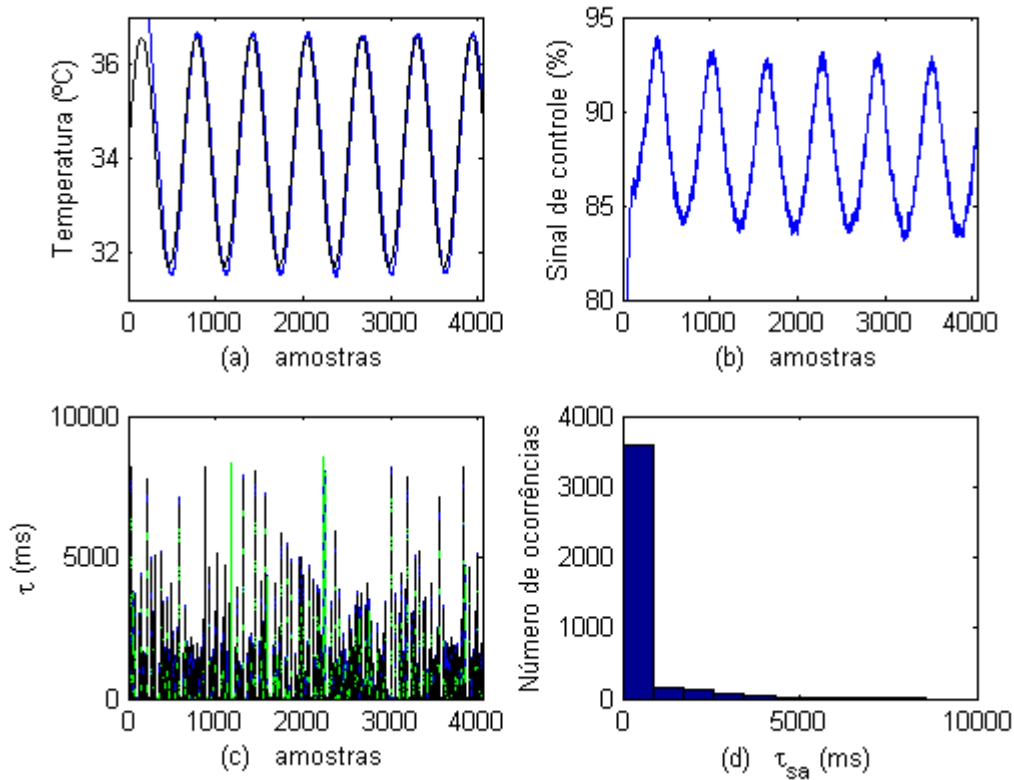


Figura 6.40: Ensaio 2, PI, *Buffer*, referência Senoidal com 0,01rad/s: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}

assimétrica) além do grande potencial de economia de energia. Na literatura vários trabalhos têm sido desenvolvidos visando um melhor desempenho dos sistemas de refrigeração [Batista, 2006], [Avila e Jota, 2011], [Jota et al., 2011], [Oliveira et al., 2011], [Schurt et al., 2010], [Schurt et al., 2009].

Tendo em vista que este trabalho está inserido no projeto P&D 263 CEMIG-ANEEL (CMUF-R) será utilizada uma câmara similar às encontradas no HBH. Frente aos requisitos do projeto CMUF-R de aplicações em câmaras de refrigeração em um Hemocentro, busca-se com o controle desenvolvido uma redução expressiva na oscilação de temperatura e consequente melhoria na qualidade do produto armazenado, rápida rejeição a perturbação (sobretudo, abertura de portas) e menor consumo energético. A implantação do sistema de controle em rede no Hemocentro se justifica pela quantidade de equipamentos similares distribuí-

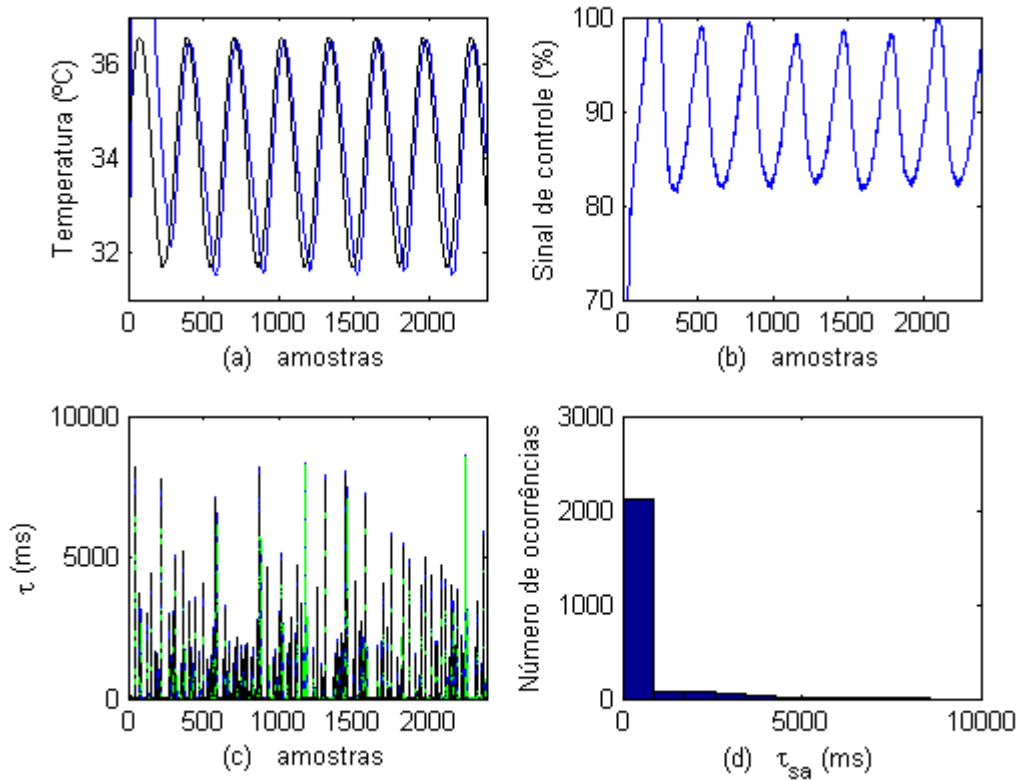


Figura 6.41: Ensaio 3, PI, *Buffer*, referência senoidal com 0,02rad/s: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

dos em toda a edificação, com vantagens em relação a centralização da análise da qualidade do resfriamento, medição da energia gasta e emprego de estratégia de controle unificada, com possibilidade de integração com fontes alternativas e balanceamento de cargas (usando o conceito de *Micro-Grids*). Os resultados apresentados comprovam que há ganhos a serem alcançados com a estratégia de controle proposta em câmaras de refrigeração, para futuras aplicações do projeto CMUF-R no Hemocentro de Belo Horizonte.

Dada as restrições físicas da planta descrita no Capítulo 4, a estratégia denominada Controle Modulado com Restrição acoplada com um controlador PI foi implementada. As estratégias de compensação dos atrasos não foram implementadas para este processo, visto que a planta tem uma dinâmica extremamente lenta (constante de tempo igual a 18000 segundos) e que os atrasos naturais

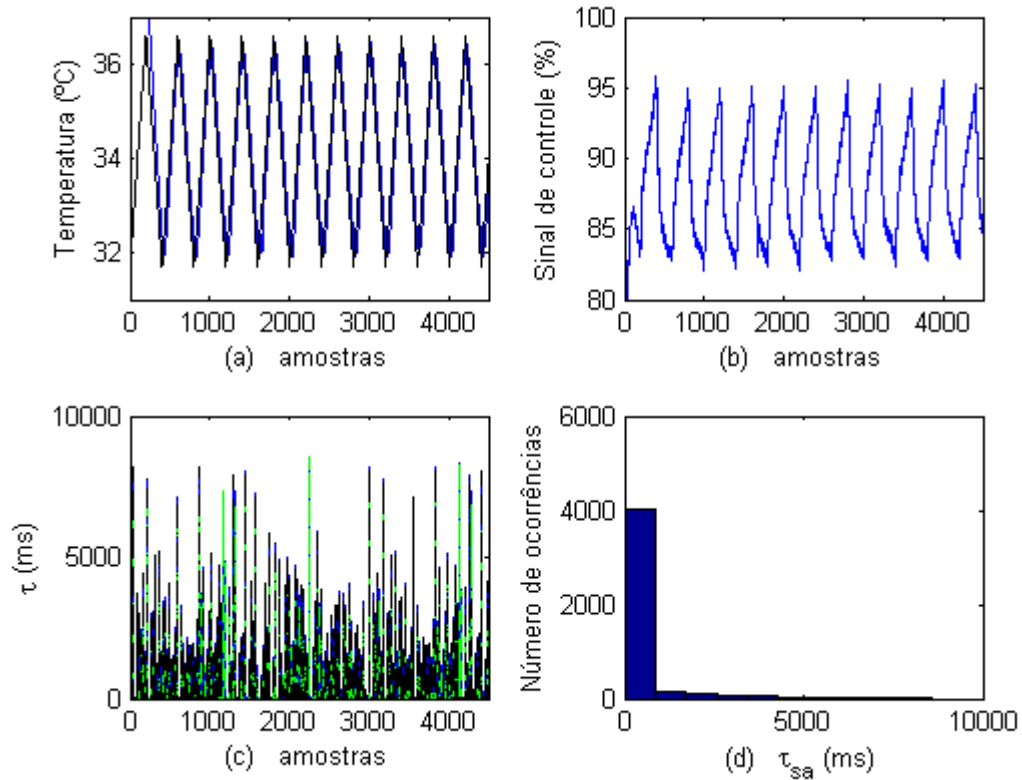


Figura 6.42: Ensaio 4, PI, *Buffer*, referência triangular: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa}

da rede medidos nos ensaios não foram significativos o suficiente para afetar o comportamento desta malha. Ressalta-se que, o principal objetivo é investigar o controle em rede para processo desse tipo e apresentar uma solução de controle em rede para um equipamento comercial que atenda os requisitos do projeto CMUF-R descritos acima.

Alguns ensaios foram realizados na câmara com controle proposto com um *setpoint* de -15°C de forma a se poder observar o comportamento do controlador sem este permanecer em um dos seus limites (0 ou 100%) por muito tempo; este valor de *setpoint* foi escolhido por estar no meio da faixa de temperatura negativa em que a câmara opera, sendo a temperatura mínima igual a -31°C . Em todos os ensaios realizados, para aumentar a carga térmica no interior da câmara foi colocada uma tira de papelão entre a borracha e a porta evitando assim a

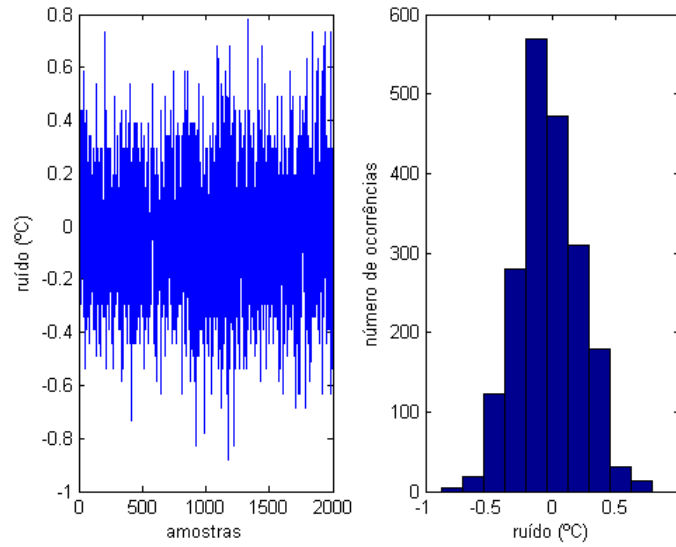


Figura 6.43: Ruído adicionado na medida (a) ruído (b) histograma.

completa vedação da mesma.

A Figura 6.47 (a) mostra o perfil de variação de temperatura interna da câmara sob controle (com a estratégia de Controle Modulado com Restrição) por mais de 5 dias. Para avaliação da capacidade de rejeição à perturbações, foram realizadas três aberturas de porta (com ângulo de aproximadamente 90°) durante este ensaio, indicadas pelos picos de aumento de temperatura, sendo que, a primeira abertura teve duração de 90s, a segunda de 120s e a terceira de 135s. Ressalta-se que, na primeira abertura de porta, o sistema ainda não tinha atingido o regime estacionário e portanto ocorreram maiores oscilações. Após a estabilização da temperatura interna em torno de -15°C , observa-se que o esquema de controle proposto rejeita rapidamente (em apenas uma amostra de 10 minutos) a perturbação provocada pela abertura de porta. Vale destacar que, em algumas análises feitas através do monitoramento contínuo realizado em câmaras de refrigeração do Hemocentro de BH, operando a -80°C , o sistema de controle convencional gasta várias horas para rejeitar totalmente a perturbação de abertura de porta [Jota et al., 2013].

Na Figura 6.47, observa-se também que, após a estabilização da temperatura interna, as oscilações da mesma ficam predominantemente entre $\pm 0,5^\circ\text{C}$,

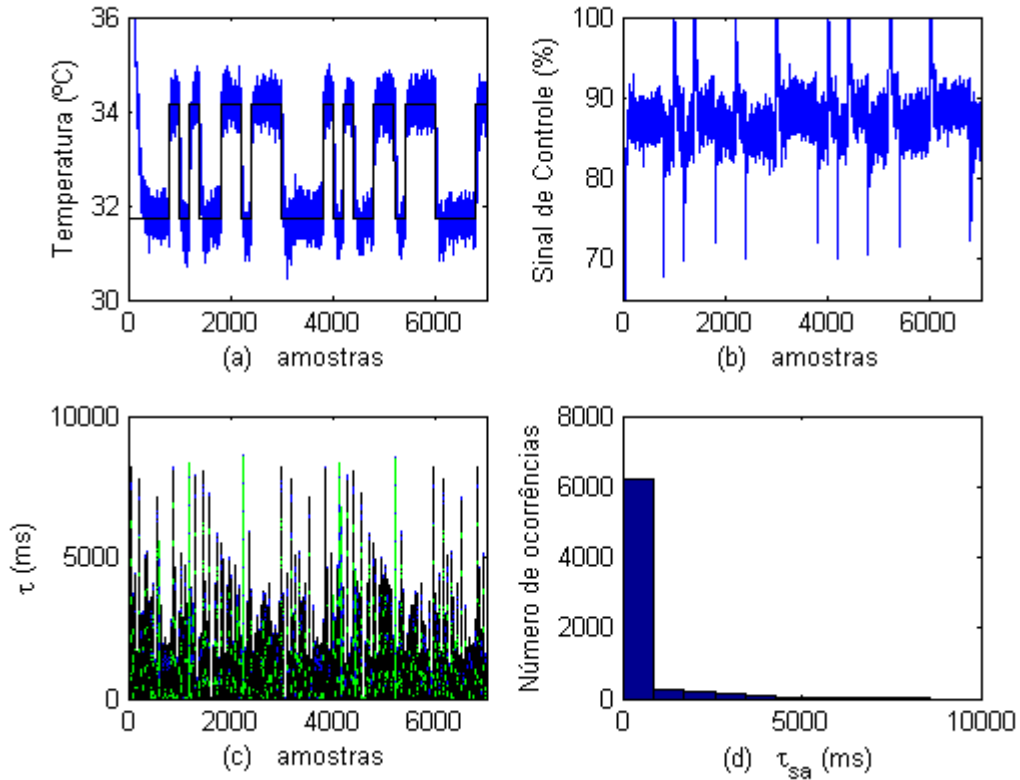


Figura 6.44: Ensaio 5, PI, *Buffer*, com Ruído: (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

chegando a atingir em alguns poucos casos $\pm 1^\circ\text{C}$. A Figura 6.47 (b) apresenta os atrasos medidos entre as mensagens do sensor e de reconhecimento do atuador, τ_{sa} , que são também mostrados em escala ampliada na Figura 6.48. Observa-se que os atrasos medidos são muito menores que um período de amostragem (10 minutos), em uma única amostra o atraso atingiu o valor máximo de 64248ms, o atraso médio foi igual a 242ms, o mínimo 8ms, a variância igual a $5,73 \times 10^6 \text{ms}^2$ e a mediana 12ms. Como os atrasos são muito menores do que um período de amostragem os seus efeitos não são evidentemente pronunciados.

A Figura 6.49 (a) mostra o perfil do sinal de controle superposta ao da temperatura ambiente, neste gráfico não é possível perceber claramente uma correlação direta entre o sinal de controle e a temperatura externa. Entretanto, na Figura 6.50 em que o sinal de controle é mostrado em escala ampliada superposto com

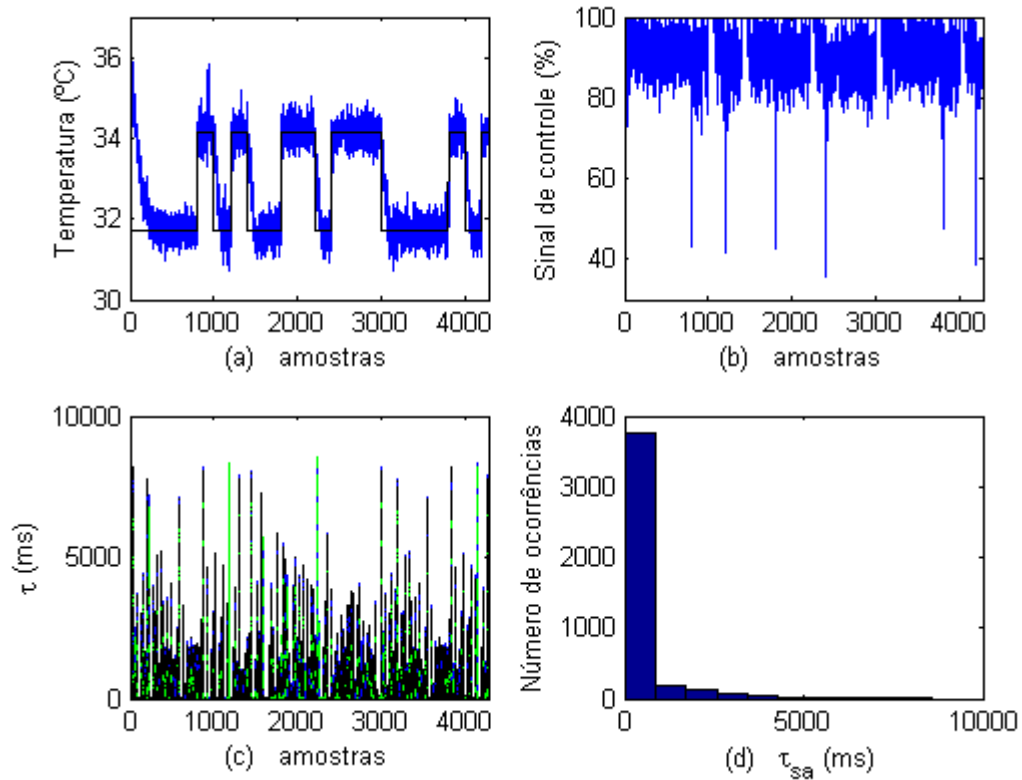


Figura 6.45: Ensaio 6, PI, *Buffer*, com Ruído e Sintonia 2 ($\tau_d = 5s$): (a) Saída da malha (azul) e referência (b) sinal de controle (c) atrasos: τ_{sa} (linha contínua em azul), τ_{sc} (linha tracejada em verde), τ_{ca} (linha traço-ponto em preto) (d) histograma com número de ocorrências por faixa de atrasos τ_{sa} .

sua respectiva média móvel (com uma janela temporal de 10 amostras) é possível perceber, pelo perfil das oscilações da temperatura externa e do sinal de controle, a existência da correlação entre estas variáveis.

Na Figura 6.49 (b) é apresentado o ciclo de trabalho, ou seja, o tempo em que o sistema permanece ligado a cada período de amostragem de 10 minutos. Observa-se que, nos instantes das aberturas de porta, o ciclo de trabalho foi máximo igual a 10 minutos. A Figura 6.49 (c) mostra o valor armazenado no ‘Banco’, por volta de 2,6h o valor do sinal de controle calculado corresponde a um ciclo de trabalho de 7 minutos; entretanto, devido à restrição de 4 minutos entre um desligamento e o religamento, a câmara permaceu ligada por 6 minutos e o atuador armazenou 1 minuto no ‘Banco’ para aplicar na amostra seguinte. Em torno do instante 90, o sinal de controle calculado correpondeu a um ciclo de

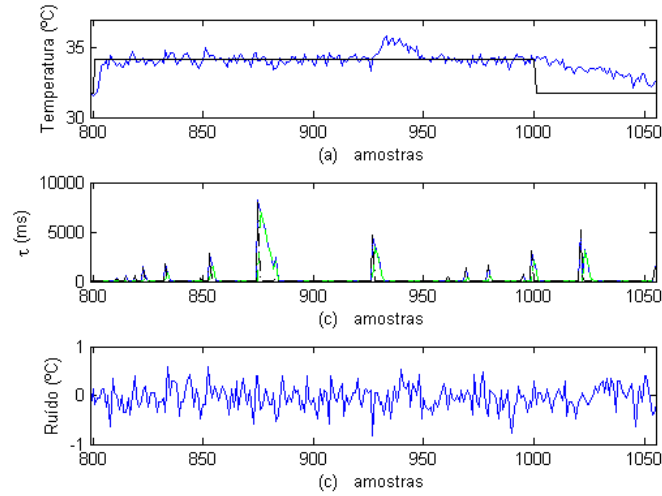


Figura 6.46: Ensaio 6, PI, *Buffer*, com Ruído e Sintonia 2 ($\tau_d = 5s$):(a) Saída da malha e referência (b) atrasos (c) ruído.

8 minutos, a câmara ficou ligada por 6 minutos e 2 minutos foram armazenados no ‘Banco’.

A Figura 6.51 apresenta os valores de corrente e tensão medidas, mostrando em detalhe o efeito da terceira abertura de porta, comprovando que o compressor ficou ligado por um período maior, conforme esperado, para rejeitar a perturbação. A tensão e corrente medidas no ciclo em que o equipamento estava ligado ficaram em torno de 90V e 1,65A respectivamente. Para quantificar o consumo específico deste equipamento nesta condição operacional com *setpoint* igual a -15°C, calculou-se a potência aparente média em um período de 24 horas, obtendo o valor de 63VA. A potência ativa não foi calculada, uma vez que o fator de potência não está sendo medido.

A Figura 6.52 apresenta os perfis de temperatura interna e externa e a corrente da câmara operando no modo liga desliga convencional do equipamento com tensão nominal de 127V, condição em que a corrente se mantém em torno de 2,05A no ciclo ligado. A temperatura no interior da câmara variou de -22°C a aproximadamente -27°C, ou seja, apresentou uma oscilação de $\pm 2,5^\circ\text{C}$. A potência aparente média neste ensaio foi de 149 VA. O controle convencional deste equipamento não permite a operação em qualquer *setpoint*, já que este possui

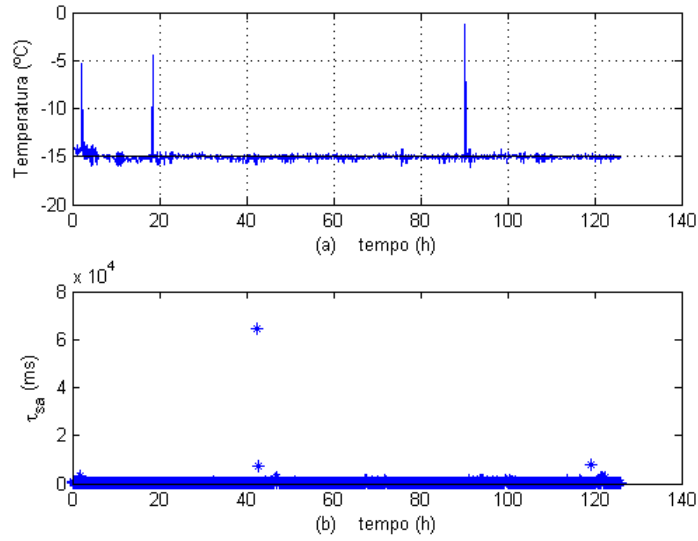


Figura 6.47: Ensaio 1: (a) temperatura interna da câmara e setpoint igual a -15°C (b) atrasos reais medidos.

3 ajustes denominados de mínimo frio, máximo frio e médio frio; o ensaio com o controle convencional foi realizado na condição de mínimo frio. Entretanto, a potência aparente média para operação em -15°C com o controle convencional pode ser estimada em função da carga térmica retirada do interior da câmara e da potência média consumida neste ensaio realizado, com dados apresentados na Figura 6.52. A carga térmica estimada pode ser calculada considerando a diferença da temperatura inicial menos a final. A potência aparente média estimada para operação no modo convencional com *setpoint* de -15°C foi de 95VA.

Com a implementação da estratégia de controle em rede proposta obteve-se uma redução expressiva na oscilação de temperatura (o que consequentemente traz melhoria na qualidade do produto armazenado), rápida rejeição a perturbações (abertura de portas), flexibilidade do ponto de operação e uma economia expressiva de energia; sendo a potência aparente estimada de 95VA no controle convencional e de 63VA no controle proposto, ou seja, resultando em uma economia em torno de 34%. Outros ensaios realizados na câmara com o controle proposto também foram realizados (um exemplo é apresentado no Apêndice C), mas dada a limitação no tamanho do texto, nem todos puderam ser apresentados.

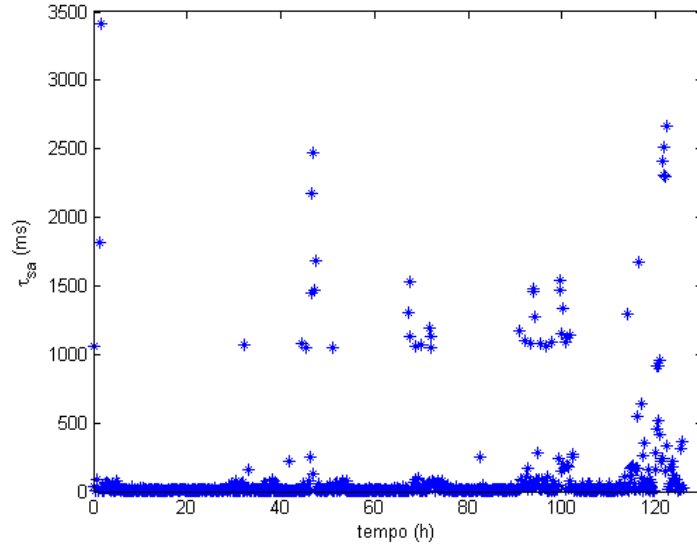


Figura 6.48: Atrasos medidos: escala ampliada.

6.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados diversos ensaios em NCS reais com diferentes plantas com constantes de tempo da ordem de dezenas de milissegundos a centenas de minutos (cobrindo uma faixa de mais de 5 ordens de grandeza). Os resultados confirmam a tese que, é necessário considerar de alguma forma as estatísticas dos atrasos para análise de sistemas de controle em rede. Constatou-se que atrasos muito superiores a um período de amostragem podem ser suportados pelos NCSs reais sem instabilizar o sistema desde que tenha probabilidade de ocorrência pequena, conforme mostrado nos resultados com relações de τ_{max}/h superiores a 19 na malha de luminosidade e superiores a 8 na malha de temperatura. Atrasos superiores a 20 amostras não foram implementados, uma vez que se requer modificações na plataforma NCS-CMUF. Para prova de conceito, considerou-se suficiente uma relação τ_{max}/h superior a 19, uma vez que esta vai muito além da relação de 1 ou 2 períodos de amostragem normalmente avaliadas na literatura. Outra constatação relevante foi que valores de atrasos médios superiores ao limite de atraso máximo constante foi suportado pelo NCS real na malha de luminosidade sem instalizá-la. Constatou-se também que, os mesmos valores

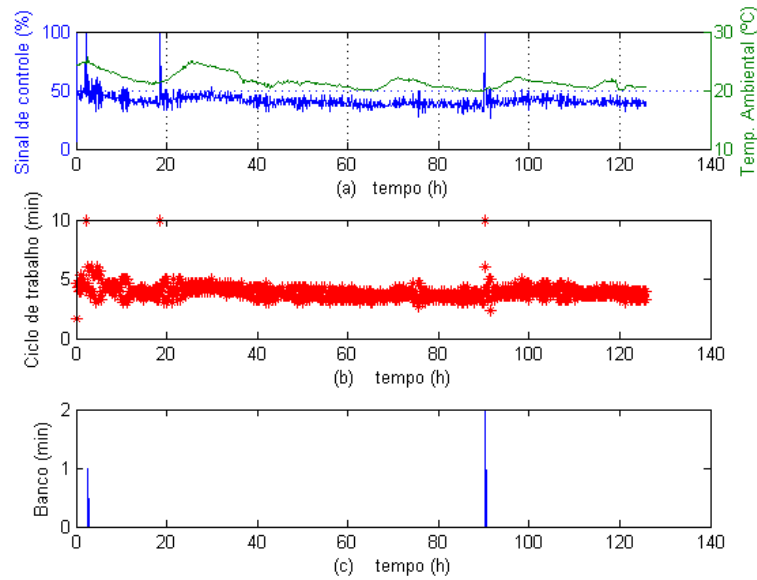


Figura 6.49: Ensaio 1: (a) sinal de controle e temperatura ambiente (b) ciclo de trabalho (c) banco.

de atrasos máximos produzem diferentes respostas dependendo do instante em que estes ocorrem, uma vez que os estados do processo podem estar em diferentes condições.

A partir dos resultados experimentais, foi possível constatar que o uso de Preditores de Smith Adaptativos é uma alternativa para compensação dos efeitos dos atrasos em NCS, mas a implementação desta técnica exige que as mensagens tenham estampas de tempo. A Estratégia de Compensação Explícita é uma alternativa interessante para NCSs em que as mensagens não possuem estampas de tempo; entretanto, requer um estudo mais aprofundado para análise da influência do filtro utilizado nesta estratégia. Os controladores implementados foram todos baseados em eventos, esta estratégia pareceu conferir grande robustez aos NCSs analisados, no que se refere aos efeitos dos atrasos da rede real.

A implementação da Estratégia de Controle Modulado com Restrição utilizando o controlador PI aplicada à câmara de refrigeração resultou em ganhos energéticos expressivos (da ordem de 34%) e uma redução nas oscilações de temperatura de 5°C para 1°C predominantemente. Os ganhos alcançados, acoplado à flexibilidade do controle em rede e ao baixo custo da plataforma, justifica a im-

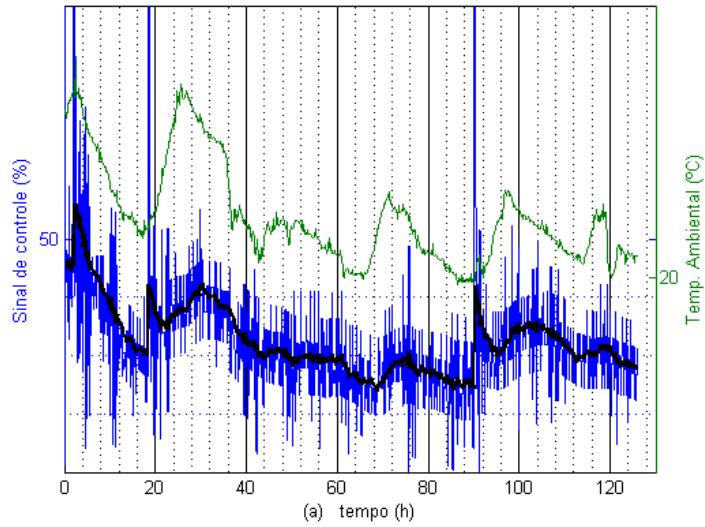


Figura 6.50: Ensaio 1, escala ampliada: sinal de controle (azul) e sua respectiva média móvel com janela temporal de 10 amostras (preto), temperatura ambiente (verde).

plantação em sistemas de refrigeração de pequeno porte que são responsáveis por uma parcela significativa do consumo energético. A melhoria na qualidade do controle alcançada com a redução nas oscilações de temperatura reflete a viabilidade para aplicação em câmaras de refrigeração, em que a flutuação de temperatura é um fator crítico como por exemplo nos Hemocentros; a implementação da estratégia de controle proposta pode refletir na redução das perdas de produtos nobres como sangue e hemoderivados. Como os efeitos dos atrasos da rede real na malha de temperatura interna da câmara não foram expressivos, dada a característica dinâmica lenta desta planta (constante de tempo de horas), não justificou a implementação para este processo das demais estratégias de controle utilizadas para compensação dos efeitos dos atrasos abordadas na presente tese, a saber PI+PS, PI+CE e PI+PS+CE.

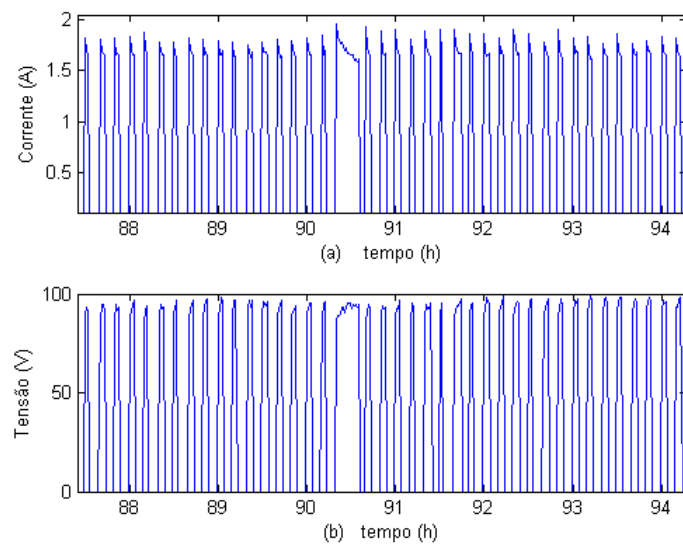


Figura 6.51: Ensaio 1: (a) corrente (b) tensão: escala ampliada com detalhe da abetura de porta.

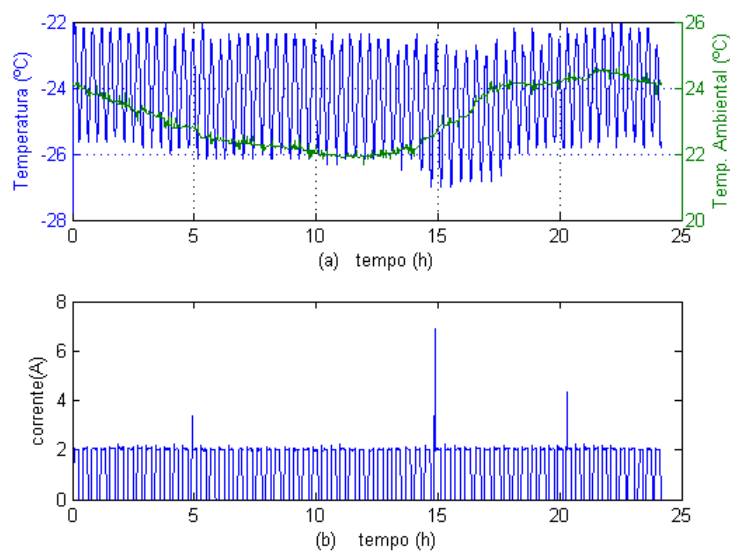


Figura 6.52: Liga Desliga Convencional: (a) temperatura da câmara e temperatura ambiente (b) corrente.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões Gerais

As análises e conclusões apresentadas neste trabalho são embasadas em centenas de horas de ensaios e um número superior a um milhão de amostras de dados coletadas em NCSs reais implementados em plantas físicas com diferentes comportamentos dinâmicos. Embora nem todos os ensaios realizados puderam ser apresentados na Tese (por uma questão de espaço), todos contribuem para uma avaliação mais consistente e realística do comportamento dos NCSs implementados. Ressalta-se a importância do monitoramento contínuo por longo período e com um grande número de amostras para que uma análise como essa possa ser realizada.

Nesta Tese, foi realizado um amplo levantamento bibliográfico publicado em [Batista e Jota, 2013] que revelou que poucos resultados experimentais são encontrados na literatura. Embora exista uma vasta gama de artigos relacionados a NCSs que trazem contribuições relevantes para área, ainda há uma grande dificuldade na integração dos problemas típicos de NCSs presentes em casos reais. Nas metodologias analisadas na literatura consultada, várias discussões apontam para a necessidade de obtenção de resultados menos conservadores para análise de estabilidade e para necessidade de implantação de controladores avançados que incorporem estratégias de compensação, adaptação e previsão. Entretanto,

as metodologias (principalmente com base na teoria de Lyapunov com métodos determinísticos e sobreaproximados) que tem sido mais comumente empregadas para análise de NCSs (na verdade, muitas delas são para análise de sistemas com atrasos que são classificados como NCSs) apresentam limitações para aplicações nos casos práticos, conforme discutido no Capítulo 2. Geralmente, as relações de causa e efeito dos fenômenos presentes em NCSs reais são representados de uma forma limitada nos modelos adotados e o comportamento dos atrasos são, em geral, considerados menores que um período de amostragem e com variações suaves com derivadas limitadas entre 0 e 1 ou -1 e 1 (amostra/período de amostragem), não refletindo o comportamento de um NCS real. Vale destacar que existe a necessidade de avaliar quais os efeitos práticos destas restrições matemáticas, como por exemplo, a limitação da taxa de variação dos atrasos em NCSs reais, uma vez que na prática ocorrem atrasos com taxas de variações negativas elevadas e isto pode ser visto como um aspecto positivo. Baseado nos experimentos realizados verificou-se que quando um atraso elevado ocorre em um NCS, uma sequência de mensagens são enfileiradas e estas podem ser processadas sequencialmente em um intervalo muito pequeno de tempo (em milisegundos no caso da plataforma NCS-CMUF). Assim, um atraso com valor elevado pode ser ‘recuperado’ rapidamente se o mesmo for seguido de atrasos com taxa de variação negativa. Portanto, os atrasos em NCSs tem características específicas que requerem um tratamento diferenciado tanto na modelagem quanto nas ferramentas de análise e síntese. O estudo apresentado nesta Tese indica a importância de aprofundar as pesquisas sobre as ferramentas de análise que incorporem a probabilidade de eventos incertos (presentes em NCSs reais) ocorrerem ou não e a probabilidade das condições nominais utilizadas no projeto serem (ou não) plenamente atendidas.

Uma análise sistêmica (por meio do monitoramento contínuo por longo período) do comportamento dos atrasos em NCSs reais implementados sob a Internet foi realizada. As análises apresentadas neste trabalho confirmam que os atrasos apresentam os parâmetros estatísticos variantes no tempo e que uma única distribuição não é capaz de representar todos os comportamentos observados. Em

sistemas reais, os atrasos variam em uma ampla faixa podendo chegar facilmente a 3 ou 4 ordens de grandeza (conforme resultados apresentados nos capítulos 3 e 6 em que constatarem-se variações de atrasos em um mesmo ensaio entre 8ms e 8860ms e entre 8ms e 64248ms). Entretanto, os atrasos elevados têm probabilidade de ocorrência muito baixa. Esta constatação reforça a necessidade de que estes atrasos elevados com probabilidade arbitrariamente baixa têm que ser analisados de forma diferenciada e, dependendo do valor e da probabilidade de ocorrência, devem ser tratados como falhas. Este trabalho alerta para a importância da realização de mais investigações sobre as representações das estatísticas dos atrasos e seus efeitos sobre o projeto do sistema de controle em rede real.

Uma nova metodologia para análise das regiões mais prováveis de estabilidade em NCSs reais foi proposta. A metodologia é baseada no método de Monte Carlo e análise da resposta temporal, acoplada com o algoritmo de *Quicksot* e o método do gradiente para busca e convergência. Regiões mais amplas de estabilidade foram alcançadas com o método proposto se comparado a alguns métodos disponíveis na literatura como, por exemplo, o método de *Gridding* baseado em sobreaproximação politópica. Para permitir uma base de comparação um estudo simulado com um exemplo usual (*benchmark*) da literatura também foi apresentado. Este estudo revelou que os métodos de simulações numéricas são ferramentas interessantes e devem ser explorados para aplicação em NCSs, uma vez que estes permitem evidenciar limites práticos que podem ser utilizados como uma métrica no projeto de controle. Pode ser observado que para aumentar a confiabilidade dos resultados dos métodos numéricos, estes devem ser realizados com um maior número de amostras e longos períodos de simulação. Os limites de estabilidade práticos em NCS dependem consideravelmente da forma em que os atrasos ocorrem e podem atingir limites superiores aos atrasos fixos. O conhecimento das estatísticas dos atrasos é importante para determinar a estratégia de compensação adequada.

Para o estudo dos sistemas de controle em rede foram utilizadas três plantas físicas que representam processos de luminosidade, aquecimento e refrigeração,

com constantes de tempo variando de milisegundos a horas, incluindo processos com restrições de atuação e bilinearidade. Foram projetados controladores do tipo PI, PI com Preditor de Smith Adaptativo, com Compensação Explícita do Sinal de Controle e também a estratégia denominada de Controle Modulado com Restrição. Para o processo com constante de tempo da ordem de horas, como a malha de temperatura interna da câmara de refrigeração analisada, foi possível manter os NCSs sob controle por vários dias sem nenhuma estratégia de compensação dos atrasos da rede. A inclusão da rede no elo de realimentação não provocou efeitos expressivos no sentido de deteriorar o desempenho ou provocar instabilidade da malha, entretanto, as restrições de atuação na câmara de refrigeração foi um dos grandes desafios enfrentados. Outro desafio foi estabelecer o sincronismo entre os relógios das estações local e remota, sobretudo, para NCSs em malhas com dinâmicas rápidas como a de luminosidade, em que a constante de tempo é da ordem de milisegundos. Ressalta-se que, quanto mais rápida for a dinâmica da malha maior é a precisão requerida no sincronismo e consequentemente maior a dificuldade em estabelecê-lo.

Foram realizados diversos ensaios com as diferentes estratégias de controle em NCSs com as plantas físicas reais e com as estações locais e remotas distanciadas mais de 10km entre si. Os resultados apresentados mostraram a eficácia das metodologias de controle implementadas para aplicação em casos práticos, destacando o desempenho dos controladores para a compensação dos efeitos dos atrasos variantes. Os resultados experimentais confirmam a hipótese que, se for considerado somente o atraso máximo como parâmetro, o projeto dos controladores, pode de fato levar a resultados desnecessariamente conservadores. Além disso, constatou-se que atrasos muito superiores a um período de amostragem podem ser suportados por NCSs reais mesmo quando projetados para atrasos muito menores. Relações entre o atraso e o período de amostragem (τ_{max}/h) superiores a 19 foram apresentadas com o sistema permanecendo estável, ratificando que o uso de ferramentas que limitem o atraso máximo a um período de amostragem são de fato muito restritivas.

Os diversos ensaios na plataforma NCS-CMUF refletem a viabilidade da aplicação e a flexibilidade da plataforma para implementação de NCSs. O desenvolvimento de uma plataforma aberta e conhecimento de todos os níveis de *hardware* e *software* é primordial para proposição e implantação de um trabalho de doutorado de caráter experimental como este. A seguir são destacadas as contribuições da Tese e algumas sugestões para trabalhos futuros.

7.2 Contribuições da Tese

1. Publicações em Periódicos:

(I). Batista A. P. and Jota F. G., ‘On the effects of time delay variations in the design of Networked Control System’, International Journal of Systems, Control and Communications, Vol. 5, No. 2, 2013.

(II). Batista A. P. and Jota F. G., ‘Effects of Time Delay Statistical Parameters on the Most Likely Regions of Stability in an NCS’. Aceito para publicação no periódico Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 2014.

(III). Batista A. P., Freitas, M. E. A., Jota F. G., ‘Evaluation and Improvement of the Energy Performance of a Buildings Equipment and Subsystems through Continuous Monitoring’. Aceito para publicação no periódico Energy and Buildings, 2014.

Dado que poucos artigos de revisão sobre a área de NCSs estão disponíveis na literatura, ressalta-se que o estudo publicado em (I) contribui e aponta as direções futuras desta importante área tecnológica. O referido *Review* publicado tem enfoque nas aplicações práticas o que contribui para redução do distanciamento existente entre os desenvolvimentos teóricos e as aplicações reais.

2. Estudo dos Atrasos em NCS reais: A Tese apresenta um estudo das estatísticas dos atrasos em NCSs reais sob vários *link* de rede, incluindo a rede mundial (pública). Os atrasos em sistemas de controle em rede reais, especialmente os implementados sob a Internet, podem apresentar grandes variações e diferentes parâmetros estatísticos. A análise das estatísticas dos atrasos em

NCSs reais é importante para que se possa projetar estratégias de compensação adequadas.

3. Sincronização Dinâmica dos Relógios: Nesta Tese foi implementada uma estrutura de sincronização dinâmica entre os relógios das estações locais e remotas. O mecanismo ativo de sincronização utilizado para compensar a diferença relativa entre os relógios é composto por um mecanismo de *reset* das estações locais, que é realizado por meio de uma mensagem via *broadcast* enviada pelo *webserver*, sendo que o sincronismo entre o *webserver* e a estação remota é estabelecido via servidor de NTP padrão. Esta estrutura de sincronização dinâmica confere maior precisão da medição dos atrasos em NCSs e, portanto, permite que estes sejam usados para uma melhor compensação em estratégias de controle.

4. Ferramenta de Análise Proposta: Uma contribuição relevante é a estratégia de análise proposta para fornecer as regiões mais prováveis de estabilidade de NCSs reais sujeitos a atrasos variantes. A metodologia probabilística baseada no método de Monte Carlo e análise da resposta temporal é aplicável nos casos práticos e aponta para limites mais realísticos para a região de fronteira de estabilidade. Poucos são os trabalhos que usam a abordagem probabilística, mas nenhum deles usam casos práticos com a diversidade aqui apresentada.

5. Estudo de Estratégias de Controle Aplicáveis a NCS Reais: Outra importante contribuição é o estudo de estratégias de controle aplicáveis a NCSs reais. O estudo aponta que o uso do Preditor de Smith Adaptativo como proposto (baseado nos atrasos efetivamente medidos em tempo real e posteriormente filtrados, diferentemente de outros trabalhos publicados na literatura que usam estimativas dos atrasos [Lai e Hsu, 2010] e [Lai et al., 2008]) é uma boa alternativa para compensação dos efeitos dos atrasos em NCSs reais em que as mensagens possuem estampas de tempo. O estudo mostra ainda que, a Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle é bastante interessante para NCSs em que as mensagens não possuem estampas de tempo, entretanto, existe uma influência da escolha do filtro que requer maiores investigações. No estudo apresentado constatou-se também que estratégias clássicas como o controlador PI resultou em

desempenho satisfatório quando aplicados a NCSs com processos com dinâmicas muito lentas, em que a relação τ_{max}/h é bem menor que 1. A avaliação do desempenho de diferentes estratégias de controle realizadas em NCSs reais e também com processos com constante de tempo que variam de milsegundos a horas, possibilitou uma análise mais abrangente e realística. O estudo refletiu também que o controle disparado por evento se mostrou bastante robusto nos NCSs reais avaliados.

6. Melhorias dos Sistemas de Refrigeração (Aplicação): No estudo de caso apresentado em uma câmara de refrigeração com a estratégia de controle implementada, denominada de Controle Modulado com Restrição, foi possível obter redução expressiva na oscilação de temperatura e rápida rejeição a perturbação (abertura de portas). Constatou-se que, o atuador baseado em TRIAC é barato e robusto para aplicações de pequeno porte e, se comandado por uma estratégia de controle adequada, pode resultar em economia expressiva de energia e flexibilidade do ponto de operação. Ganhos energéticos expressivos e na qualidade do produto armazenado foram alcançados. Estes resultados contribuem para as futuras aplicações em Hemocentros, dentro do projeto CMUF-R, que poderão resultar em redução na perda de sangue e hemoderivados, trazendo portanto uma contribuição social relevante.

7. Melhorias na Plataforma NCS-CMUF: As novas funções implementadas na plataforma NCS-CMUF para possibilitar o controle em rede, operando continuamente, agrega uma contribuição de *software* para o projeto CMUF-R. Além da implementação da sincronização dinâmica dos relógios e de funções específicas do controle em rede e de chaveamento local/remoto, destaca-se também o tratamento do número serial das mensagens para detecção de repetição e perdas de pacote. Uma contribuição de *hardware* também foi concedida no desenvolvimento desta Tese, além dos sensores especificados e condicionados, destaca-se as melhorias realizadas nos sistemas de atuação, sobretudo, com relação aos sistemas de proteção de falta para garantir uma operação segura. Foram feitas melhorias nos projetos anteriores para disponibilizar no projeto CMUF-R três

tipos de atuadores para controle de cargas monofásicas e trifásicas, a saber, um circuito baseado em Triac para permitir variação da tensão de alimentação, um inversor de frequência baseado em uma ponte de IGBTs que permite o controle da frequência e da tensão e, um inversor de frequência baseado em um módulo integrado IIRAM para controle de cargas trifásicas.

7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para continuidade das investigações sobre sistemas de controle em rede são apresentadas a seguir, bem como algumas possibilidades de aplicações futuras. Estas sugestões surgiram devido aos problemas encontrados e possibilidades de aplicações vislumbradas ao longo do desenvolvimento do trabalho e, ressaltam alguns aspectos importantes que não foram abordados ou aprofundados nesta Tese, enfatizando a necessidade da continuidade dos estudos nesta importante área tecnológica.

1. Micro-Grids: Dentre as aplicações em trabalhos futuros, destaca-se a área de geração e consumo distribuídos (*Micro-Grids*) e de redes inteligentes (*Smart Grids/ Smart Metering*). A utilização da plataforma NCS-CMUF, com as funcionalidades agregadas e os atuadores construídos ao longo do desenvolvimento desta Tese, para estudo de *Micro-Grids* é uma das propostas de continuidade. As placas dos atuadores poderão ser utilizadas para comando das cargas e das fontes e as estações CAN-PICs para medição e controle. Os controladores implementados bem como a estratégia de análise proposta poderão ser adaptadas para o problema de *Micro-Grids*.

2. Aplicações em Sistemas de Refrigeração: A estratégia de controle implementada no estudo de caso, bem como os dispositivos de atuação construídos poderão ser aplicados em sistemas de refrigeração em geral, entretanto, destaca-se a aplicação dos mesmos nas câmaras do Hemocentro de Belo Horizonte como previsto no projeto CMUF-R.

3. Análise de Estabilidade: Quanto à ferramenta de análise de estabili-

dade proposta, melhorias podem ser realizadas para a análise das regiões mais prováveis de estabilidade considerando os efeitos integrados que ocorrem em NCSs reais como perda e desordenamento de pacotes. Melhorias podem ser feitas nos métodos de busca e convergência para melhor precisão dos resultados. Outras ferramentas de análise de estabilidade que levem em conta as estatísticas dos atrasos também merecem ser pesquisadas.

4. Estudos de Formas de Incorporação das Estatísticas dos Atrasos:

A consideração das estatísticas dos atrasos ainda não recebeu a devida atenção na literatura e como esta informação pode ser efetivamente usado na modelagem, análise e síntese de NCSs é um problema em aberto, portanto, requer investigações futuras.

5. Chaveamento dos Controladores: Um dos pontos frágeis da implementação de NCSs sob a Internet são as possíveis interrupções da rede. A ocorrência de perda do *link* deve ser contornada adequadamente para garantir o sistema sob controle, sendo o chaveamento do controle para as estações locais a alternativa mais plausível. Portanto, o estudo de técnicas de chaveamento adequadas é digno de futuras investigações.

6. Implementação de Controladores Disparados por Tempo: Outra aplicação futura é a implementação de estratégias de controle disparados por tempo, e a realização de um estudo comparativo entre as estratégias de controle implementadas disparadas por evento, para avaliação de desempenho dos controladores disparados por tempo e por evento. Avaliar as condições de tráfego de mensagens nos dois casos também seria interessante.

7. Estudos sobre Filtros para Controladores com Compensação do Sinal de Controle: Os resultados apresentados na Tese apontaram uma influência da escolha do filtro na Estratégia de Compensação Explícita do Sinal de Controle, portanto, a realização de um estudo de técnicas de filtragem adaptativas seria bastante interessante para melhor o desempenho deste controlador.

8. Melhorias na Plataforma: Algumas melhorias na plataforma NCS-CMUF precisam ser feitas para possibilitar a implementação de novas funciona-

lidades, sobretudo, a migração do microcontrolador para ampliação de memória, uma vez que o espaço de memória de programa tem se tornado um gargalo, uma proposta é a substituição do PIC16F876A para o PIC18F2580 que é compatível pino a pino e possui o dobro de memória e processamento, além do módulo CAN integrado. Outras melhorias importantes são a implementação das alterações de parâmetros do controlador remoto via a página web do CMUF e estabelecer a comunicação entre as estações CAN-PICs por meio de módulos de comunicação sem fio para conferir maior flexibilidade na plataforma.

Finalmente, mas não menos importante, vale destacar que para dar continuidade às investigações sobre sistemas de controle em rede é imprescindível se avaliar a ocorrência de falhas, perdas, enfileiramento e desordenamento de pacotes, os quais os NCSs reais estão sujeitos, sob a luz da abordagem probabilística dos eventos.

Apêndice A

Questões de Representação de NCS

Neste capítulo um estudo simulado sobre aspectos de representação de NCS é apresentado. O objetivo deste estudo é analisar os efeitos da representação dos atrasos no comportamento do sistema em malha fechada. Os modelos discreto superamostrado e em espaço de estados aumentado (com atrasos representados na matriz de transição de estados usando um vetor de estados aumentado) foram analisados. Alguns aspectos como o efeito de variação da amostragem e da equivalência entre as representações são discutidos.

A Tabela A.1 apresenta as plantas e controladores utilizados no estudo deste capítulo, bem como a aplicação utilizada em cada caso. Nas figuras do presente texto, para o referido modelo em espaço de estados analisado é utilizada a sigla *ssa* e para o modelo discreto superamostrado é utilizado *discreto h_2* .

Tabela A.1: Plantas e Controladores Empregados nos Ensaios Realizados

Planta	Descrição	Controlador	Aplicações
A1	$\frac{1}{32s+1}$	PI $K_c = 1; T_i = 5.1$ $\tau_d = \tau_{ma}$ (dessintonizado) $h=5s$	Validação em um NCS Real
A2	$\frac{1}{s^2+1.5s+1}$	P $K_c = 1.5, 10 \text{ e } 15.2$ $h=0.1s$	Simulações
A3	$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ $y(t) = Cx(t)$ $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]$ Discreto: ZOH e $h = 1s$ $A_d = \begin{bmatrix} 1 & 0.9516 \\ 0 & 0.9048 \end{bmatrix}$ $B_d = \begin{bmatrix} 0.0484 \\ 0.0952 \end{bmatrix}, C_d = [1 \ 0]$	Realimentação de Estados $K_1 = 3.75$ K_2 variável $h = 1s$	Simulações
A4	$\ddot{x}_s = \frac{nr_p}{J_m + n^2 J_p}$ $n = 0.2, r_p = 14mm$ $J_m = 1.95 \times 10^5$ $J_p = 6.5 \times 10^5$	Realimentação de Estados $K_1 = 50$ $K_2 = 11.8$ $h = 1 \times 10^{-3}$	Simulações

A.1 Representações de NCS: Modelo Discreto Superamostrado e em Espaço de Estados com Vetor Aumentado

A seguir são apresentadas algumas simulações usadas para análise dos modelos discreto superamostrado e em espaço de estados com vetor aumentado aplicados a NCS, bem como análise dos efeitos da amostragem e das aproximações nas representações.

Para os resultados deste capítulo, foi utilizada a Planta A2 (Tabela A.1) com controlador proporcional para as simulações e a Planta A1 (Tabela A.1) com controlador PI para validação na rede de testes real.

A.1.1 Modelo Discreto Superamostrado

A.1.1.1 Geração dos Atrasos

Para as simulações dos modelos discretos com atraso, a alternativa usada para gerar os atrasos foi usar uma superamostragem $h_2 < h$ e considerar os atrasos como múltiplos de h_2 . A Figura A.2 apresenta um exemplo de geração de atrasos, utilizou-se uma variável auxiliar ($aux(i) = round((1/h_2) * (h + \tau_k(i) - \tau_k(i - 1)))$) para compor o vetor de sinais atrasados. Para se obter um número de amostras inteiras (em h_2) utilizou-se a função *round* (retorna o maior inteiro para frações maior ou igual a 0.5 e o menor inteiro para frações menor que 0.5). Para variações de atrasos entre amostras consecutivas maior que 1 amostragem a variável auxiliar calculada pode ser negativa, indicando desordenamento de pacote. Como nos casos analisados neste capítulo foi considerado que não há desordenamento de pacotes, ou seja, uma mensagem retida retém as consecutivas, caso a variável auxiliar seja negativa ($\tau_k(i - 1)$ maior que $h + \tau_k(i)$), assume-se que esta é igual a zero ao invés de considerá-la negativa o que implicaria em um retorno na posição do *buffer* de atrasos usados na simulação. Esta consideração se deve ao fato de que na estrutura da rede real que foi utilizada neste trabalho as

mensagens são em geral sequenciais, se uma mensagem atrasa geralmente outra não passa na frente, elas ficam retidas e quando o tráfego na rede é liberado elas são enviadas na sequência. Assim, considerou-se que se ocorrer eventualmente um desordenamento a mensagem antiga será descartada.

Ressalta-se que para obtenção dos modelos discretos utilizou-se o método com extrapolador de ordem zero (ZOH) (Figura A.1). Nas figuras que serão apresentadas a seguir para validação dos atrasos gerados, os sinais sem atraso representados por u_c já incluem o atraso de 1 amostragem do sistema discreto e os sinais com atraso representados por u_{ca} refletem os atrasos na comunicação.

Para validar os atrasos gerados, utilizou-se a Planta A2 (Tabela A.1) com controlador proporcional $K_c = 1.5$. As Figuras A.3, A.4 e A.5 apresentam exemplos de geração dos atrasos no sinal de controle, sendo estes nulo, constante igual a 0.8h e variáveis entre 0-1h, 0-2h e 0-3h. Nestas simulações utilizou-se a relação $h_2 = h/10$.

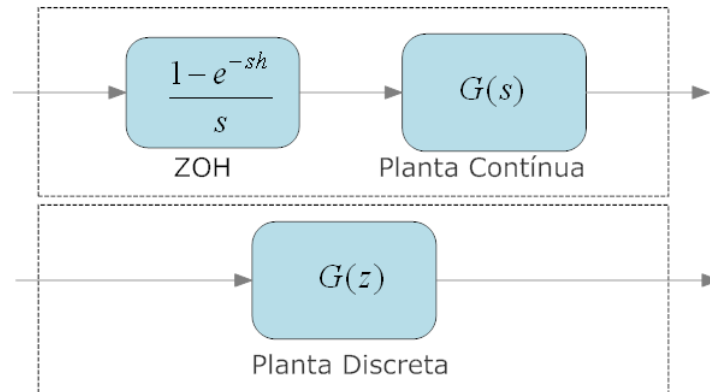


Figura A.1: Diagrama de blocos das plantas discreta e contínua + ZOH.

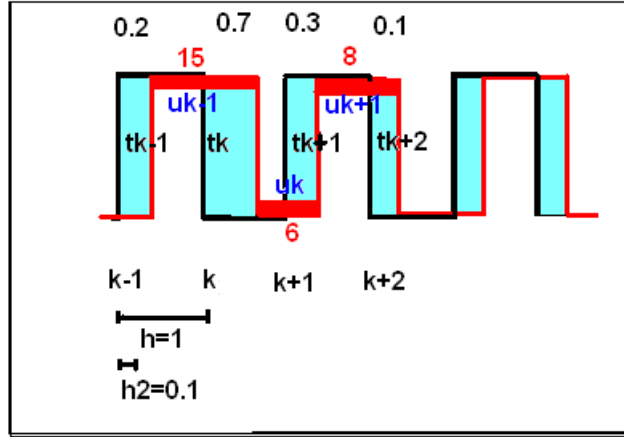


Figura A.2: Exemplo de geração dos atrasos com $h_2 = h/10$.

A.1.1.2 Efeito da Variação da Amostragem

Para verificar o efeito da superamostragem na planta discretizada, utilizou-se a Planta A2 (Tabela A.1) com controlador proporcional $K_c = 1.5$ e $K_c = 15.2$ (condição mais oscilatória), aplicando como referência uma onda quadrada. Foram avaliados os intervalos de amostragem $h = 0.1s$ e $h_2 = h/10$, $h_2 = h/100$ e $h_2 = h/1000$ e calculados os erros entre a amostragem h e h_2 . As respostas em malha fechada foram avaliadas com atraso variável com distribuição uniforme. Ressalta-se que nas simulações a alternativa da superamostragem foi utilizada para permitir a simulação de atrasos fracionários na entrada da planta discreta e a resolução do atraso variável é determinada pelo valor de h_2 ($atraso = round((1/h_2) * atraso) * h_2$), quanto menor h_2 melhor a resolução (conforme apresentado nas Figuras A.6 e A.7). Nas simulações é importante garantir que a mesma resolução dos atrasos sejam aplicadas nos modelos em análise.

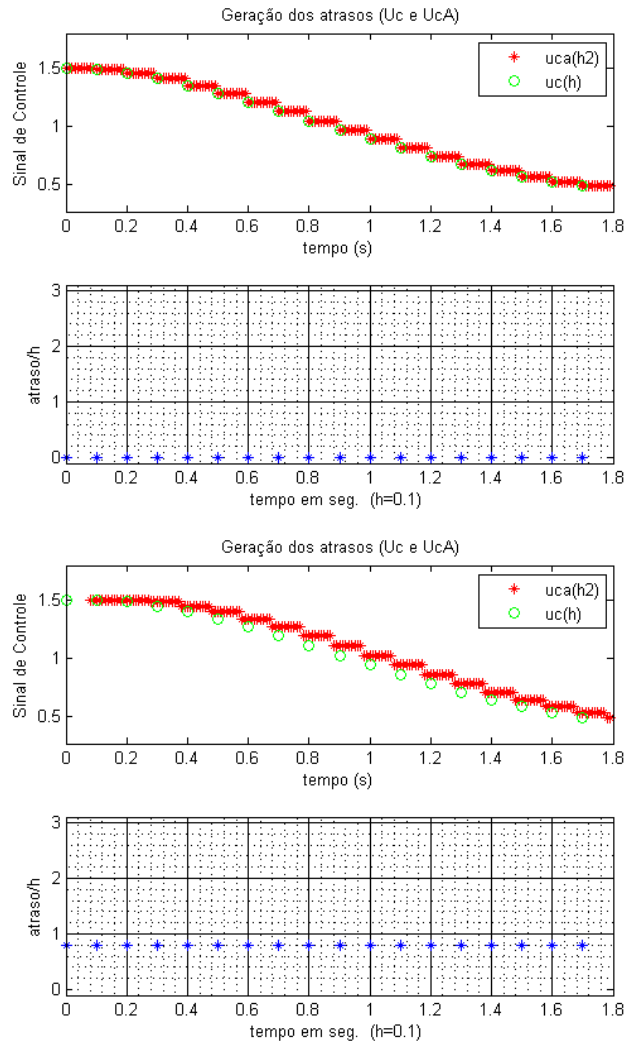


Figura A.3: Exemplo de geração dos atrasos (a) nulo (b) constante $0.8h$.

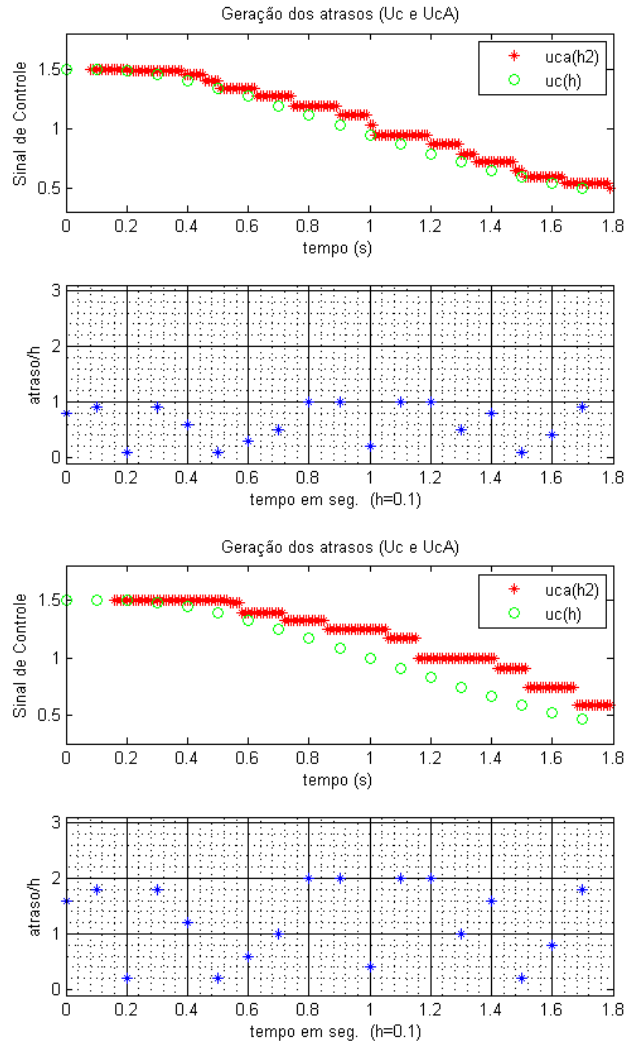


Figura A.4: Exemplo de geração dos atrasos aleatórios (a) 0-1h (b) 0-2h.

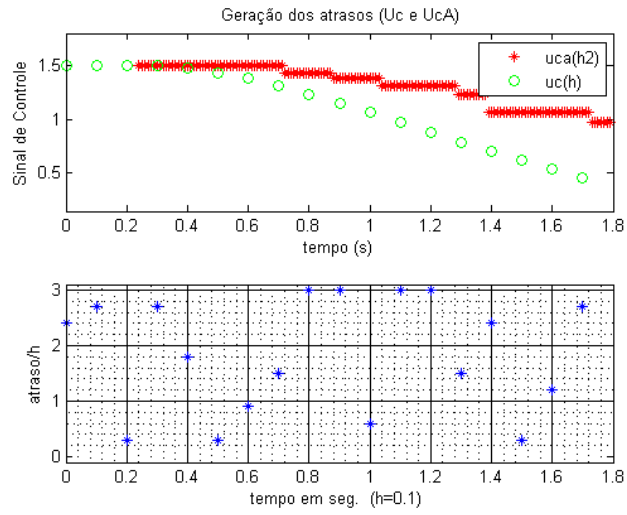


Figura A.5: Exemplo de geração dos atrasos aleatórios 0-3h.

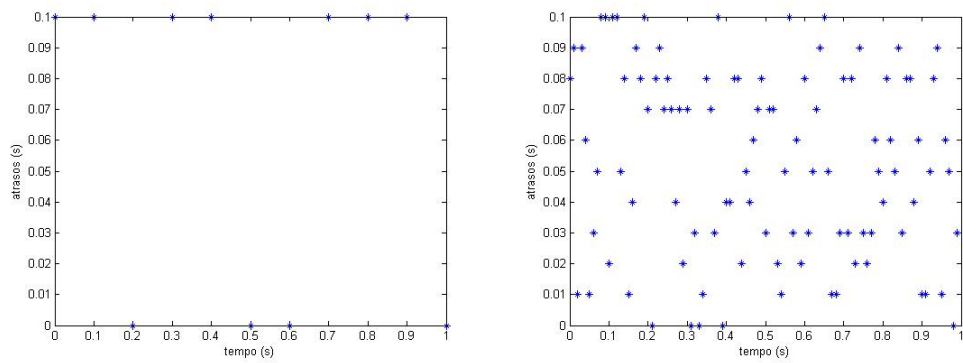


Figura A.6: Atrasos (média = 0.0499) (a) $h_2=h/1$ (desvio padrão=0.05) (b) $h_2=h/10$ (desvio padrão=0.0292).

As Figuras A.8 e A.9 apresentam as respostas ao degrau do sistema em malha fechada sob variação da amostragem com atraso uniforme (para $K_c=1.5$ e $K_c=15.2$ respectivamente).

Os erros entre a amostragem h e h_2 são apresentados na Tabela A.2.

Verificou-se que para as amostragens analisadas ($h_2 = h/10$, $h_2 = h/100$ ou $h_2 = h/1000$) os erros médios e desvios padrão foram da mesma ordem de grandeza.

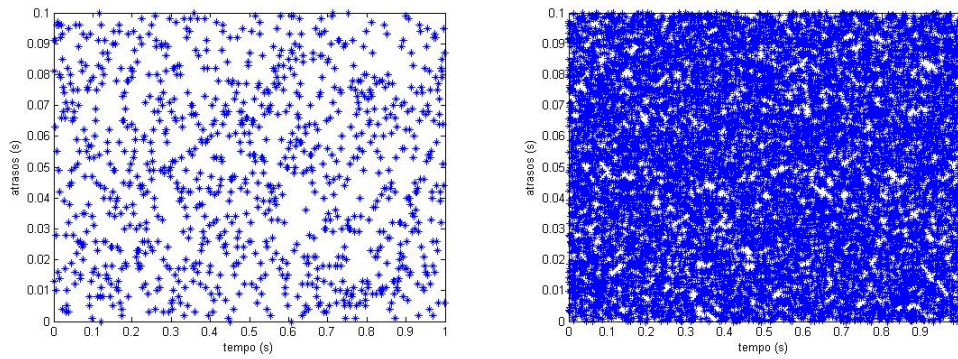


Figura A.7: Atrasos (média = 0.0499) (a) $h_2=h/100$ (desvio padrão=0.0289) (b) $h_2=h/1000$ (desvio padrão=0.0289).

Tabela A.2: Erros do Modelo Discreto Superamostrado sob Variação de h_2

K_c	h/h_2	Atraso	Erro Médio	Desvio Padrão
1.5	10	nulo	-1.6178×10^{-15}	1.5694×10^{-15}
1.5	100	nulo	7.7423×10^{-15}	9.8473×10^{-15}
1.5	1000	nulo	-1.2180×10^{-13}	1.4662×10^{-13}
1.5	10	variável	-1.6×10^{-3}	5.8×10^{-3}
1.5	100	variável	-1.6×10^{-3}	5.7×10^{-3}
1.5	1000	variável	-1.6×10^{-3}	5.7×10^{-3}
15.2	10	nulo	-4.0028×10^{-16}	1.6263×10^{-15}
15.2	100	nulo	2.2157×10^{-15}	9.4994×10^{-15}
15.2	1000	nulo	-2.9094×10^{-14}	3.2682×10^{-13}
15.2	10	variável	-1.6×10^{-3}	0.3283
15.2	100	variável	-1.8×10^{-3}	0.3351
15.2	1000	variável	-1.8×10^{-3}	0.3350

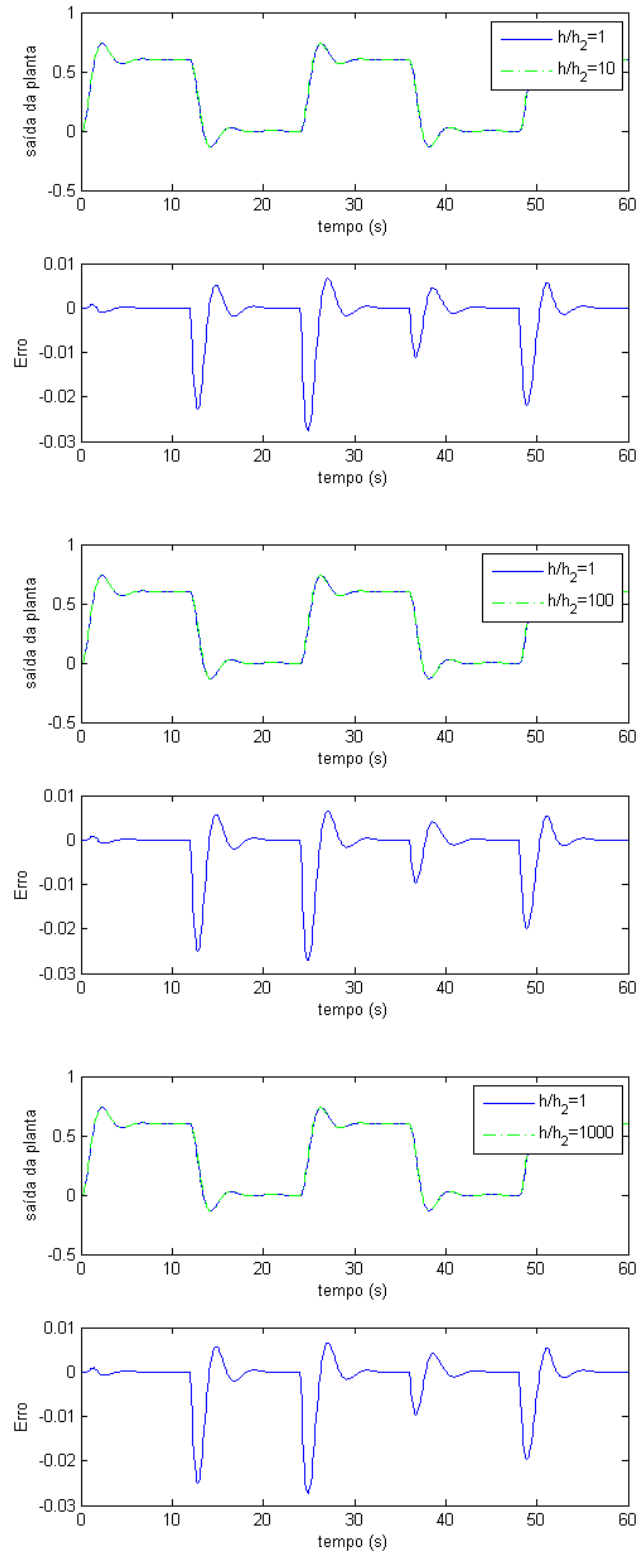


Figura A.8: Planta discreta em h_2 com atraso $K_c=1.5$ (a) $h_2=h/10$ (b) $h_2=h/100$ (c) $h_2=h/1000$.

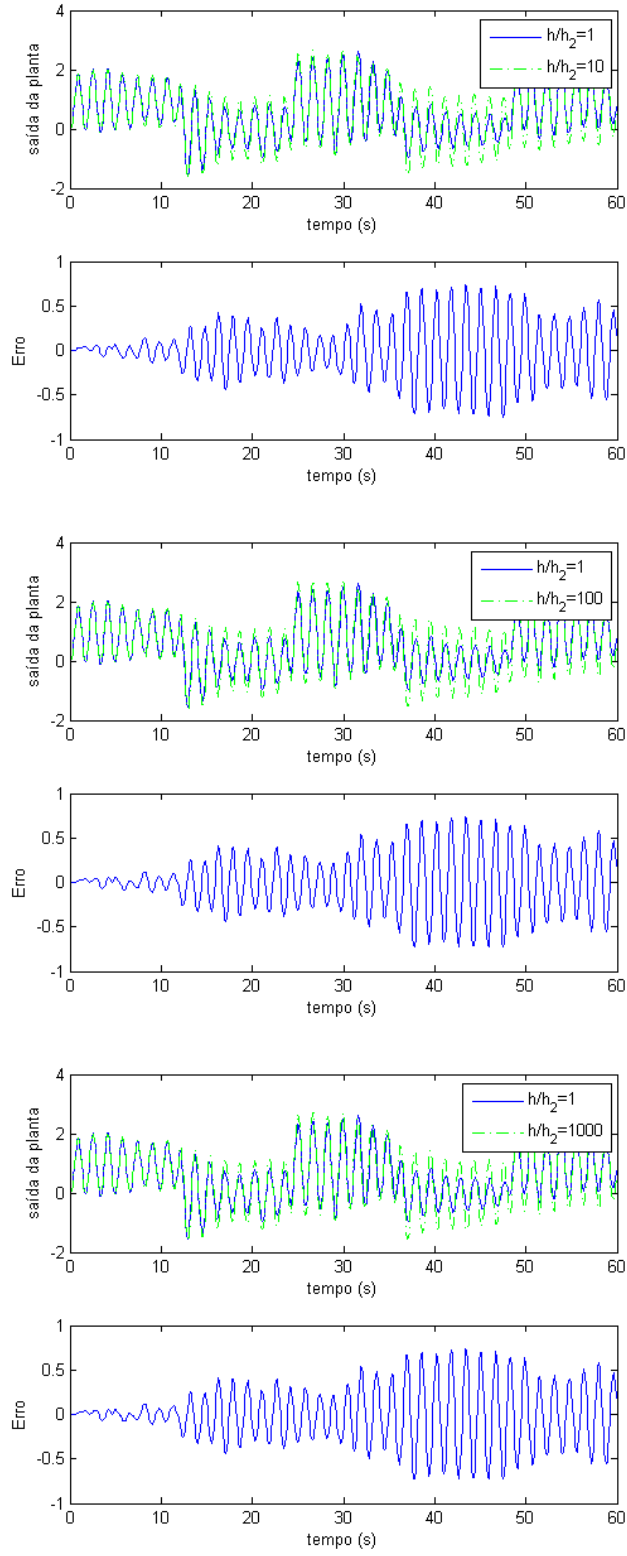


Figura A.9: Planta discreta em h_2 com atraso $K_c=15.2$ (a) $h_2=h/10$ (b) $h_2=h/100$ (c) $h_2=h/1000$.

A.1.2 Modelo em Espaço de Estados com Vetor Aumentado

A.1.2.1 Descrição do Modelo

Neste modelo o atraso representado na entrada do modelo em espaço de estados original é incorporado a matriz de transição do sistema e a entrada na amostragem anterior passa a ser um estado no vetor aumentado.

Dado um modelo em espaço de estados com atraso na entrada (Eq. A.1)

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau_k) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{A.1}$$

Efetuada a discretização no instante k , temos [Astrom e Wittenmark, 1990]:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= e^{Ah}x_k + \left(\int_{h-\tau_k}^h e^{A\tau}d\tau\right)u_{k-1} + \left(\int_0^{h-\tau_k} e^{A\tau}d\tau\right)Bu_k \\ y_k &= Cx_k\end{aligned}\tag{A.2}$$

Considerando o vetor de estados aumentado $[x_k^T, u_{k-1}^T]^T$, obtem-se a representação do modelo em espaço de estados aumentado dado pela Equação A.3 [Heemels et al., 2010].

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e^{Ah} & \int_0^h e^{A\tau}Bd\tau - \Gamma(\tau_k) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma(\tau_k) \\ I \end{bmatrix} u_k \\ y_k &= [C \ 0] \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} \\ \text{sendo } \Gamma(\tau_k) &= \int_0^{h-\tau_k} e^{A\tau}Bd\tau\end{aligned}\tag{A.3}$$

O modelo descrito pela Eq. A.3 é analisado nas subseções a seguir, sendo realizada uma comparação com a resposta do modelo discreto superamostrado.

A.1.2.2 Validação dos Modelos Discretos com Modelo da Planta Contínua para Atrasos Fixos

Nesta subseção é realizada uma comparação das respostas dos modelos discretos superamostrado e em espaço de estados aumentado (Eq. A.3) com a resposta da planta contínua simulada. Para analisar os erros entre as respostas temporais dos modelos discretos e da planta contínua em malha fechada, utilizou-se um controlador proporcional ($K_c=10$) amostrado com período de amostragem $h=0.1s$ e a Planta A2 da Tabela A.1. O modelo discreto foi superamostrado com $h_2 = h/10$. O diagrama de simulação é apresentado na Figura A.10.

A comparação entre a resposta temporal ao degrau dos modelos analisados e do modelo da planta contínua é apresentada na figura A.11 submetidos a atrasos nulo e constantes iguais a $0.8h$ e $1h$.

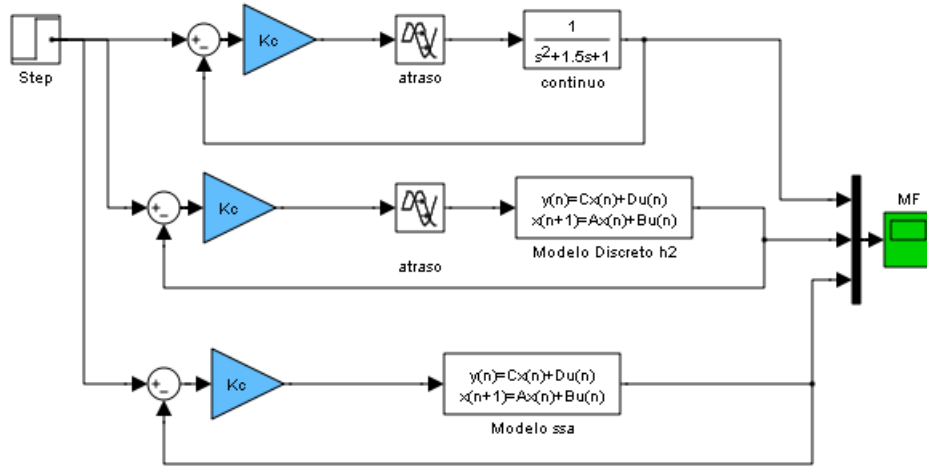


Figura A.10: Diagrama de simulação usado para análise da resposta temporal dos modelos.

Este resultado mostra que o modelo em espaço de estados com atraso representado na matriz de transição de estados pode representar a planta satisfatoriamente para atrasos fixos. A Figura A.12 mostra uma ampliação da resposta para atraso igual a h , o modelo discreto superamostrado se aproxima melhor da resposta da planta contínua uma vez está sendo utilizada a amostragem $h_2 = h/10$.

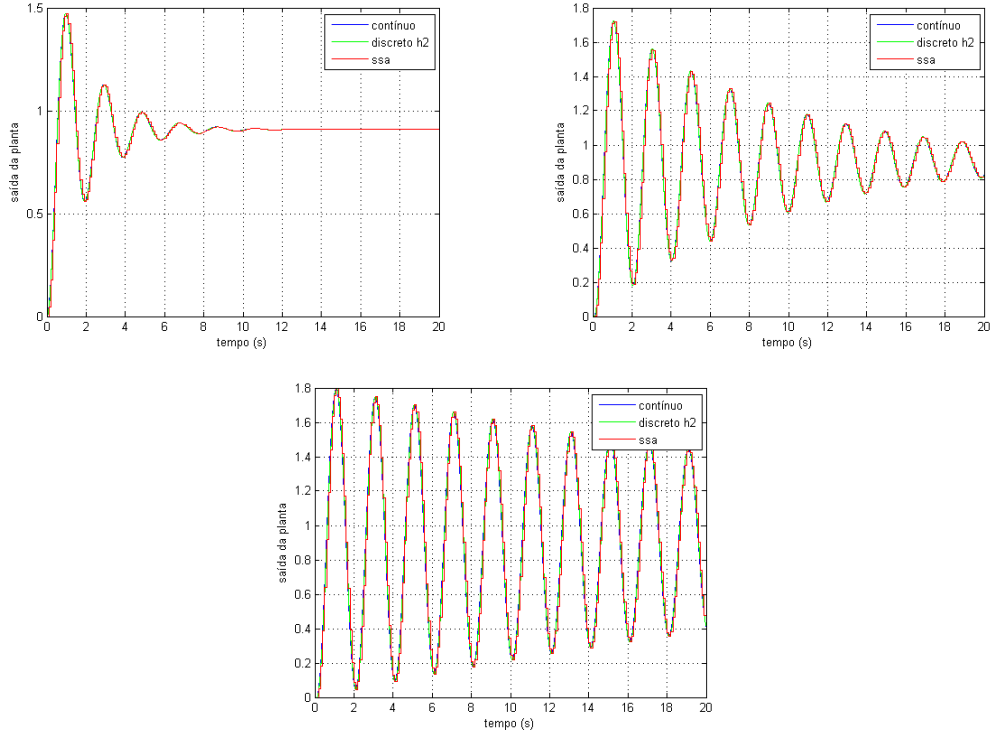


Figura A.11: Resposta em malha fechada com $K_c=10$ da planta contínua e dos modelos discreto h_2 e em espaço de estados aumentado (a) atraso nulo (b)atraso constante igual $0.8h$ (c) atraso constante igual h .

A análise dos modelos sujeitos a atrasos variantes será apresentada a seguir.

A.1.2.3 Análise das Respostas Temporais dos Modelos com Atrasos Variantes em Malha Aberta e Malha Fechada

Para análise do modelo em espaço de estados com vetor aumentado em malha aberta e em malha fechada utilizou a Planta A2 (Tabela A.1) com controle proporcional e como referência uma onda quadrada de amplitude unitária. Com objetivo de avaliar a resposta dos modelos em malha fechada e para diferentes entradas em malha aberta, realizou-se uma simulação conforme diagrama esquemático da Figura A.13. O cálculo da exponencial de matrizes é realizado por meio da aproximação de Padé com algoritmo de escalonamento e quadratura (função *expm* do software Matlab) [Higham, 2009]. O modelo discreto foi superamostrado com

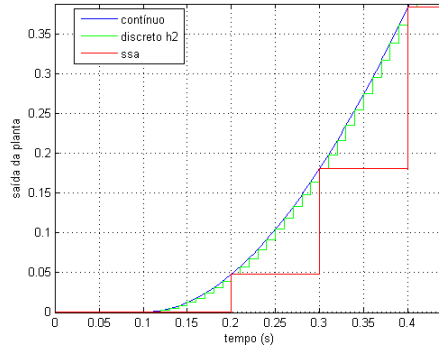


Figura A.12: Ampliação: Resposta em malha fechada com $K_c=10$ da planta contínua e dos modelos discreto em h_2 e em espaço de estados aumentado com atraso constante igual h .

($h_2 = h/10$).

A Figura A.14 apresenta as saídas em malha fechada y e y_c , as saída em malha aberta y_1 e y_{c1} para entrada u (em h) e as saídas y_2 e y_{c2} para entrada u_{ca} (em h_2) com atrasos e também o erro entre as respostas dos modelos. As Figuras A.15 e A.16 apresentam as saídas para atrasos constantes iguais a $0.8h$ e $1h$. A Tabela A.3 apresenta os erros médios e máximos e o desvio padrão entre as respostas dos modelos.

Observa-se que para atrasos nulos as respostas em malha aberta e em malha fechada dos modelos são similares com erros da ordem de 10^{-15} , conforme apresentado na Tabela A.3. Para atrasos constantes, as respostas são similares em malha fechada com erros da ordem de 10^{-16} , entretanto, em malha aberta não são coincidentes uma vez que o modelo em espaço de estados incorpora o atraso na matriz do sistema e no modelo discreto o atraso é aplicado diretamente na entrada. Por exemplo, em malha aberta para saída y_2 com entrada u_{ca} o modelo em espaço de estados com vetor aumentado incorpora duas vezes o atraso.

A Figura A.17 apresenta as respostas em malha aberta e em malha fechada do sistema sujeitos aos atrasos variantes da Figura A.18. Observa-se que para atrasos variantes entre 0 e $1h$ (Figura A.17) o sistema é bem mais amortecido que para atrasos fixos iguais a $1h$, o que reflete que para atrasos variantes limites superiores

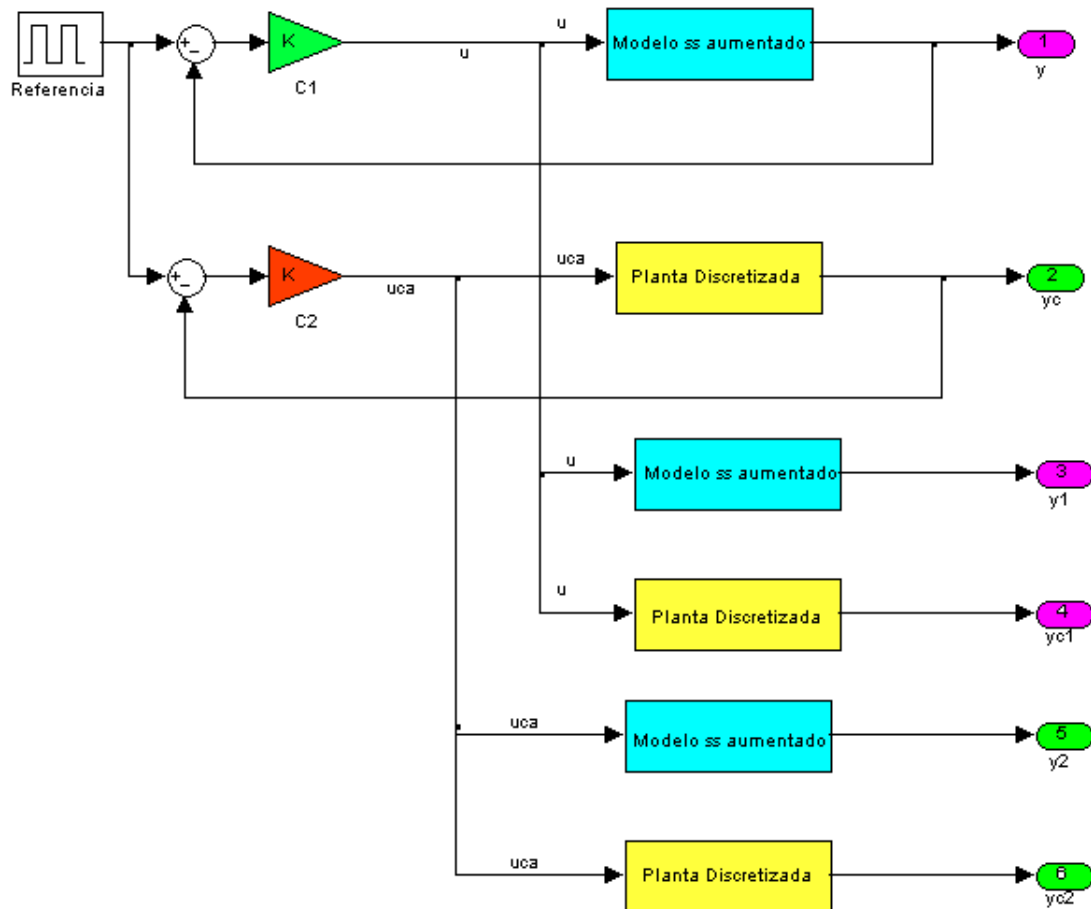


Figura A.13: Diagrama esquemático do teste de validação do modelo em espaço de estados aumentado em malha aberta e em malha fechada.

aos obtidos para atrasos fixos podem ser suportados por NCS. Ressalta-se que para casos reais estes modelos poderão apresentar erros superiores aos obtidos na simulação, uma vez que, nestas simulações não foram consideradas as demais incertezas inerentes aos processos reais. As análises das respostas temporais dos modelos com atrasos variantes em malha aberta e malha fechada apresentadas teve como objetivo a quantificar os erros apresentados pelo modelo em espaço de estados aumentado para avaliar a sua aplicabilidade para os casos práticos, portanto, uma análise do modelo em espaço de estados aumentado para um caso real é apresentada na seção A.1.3.

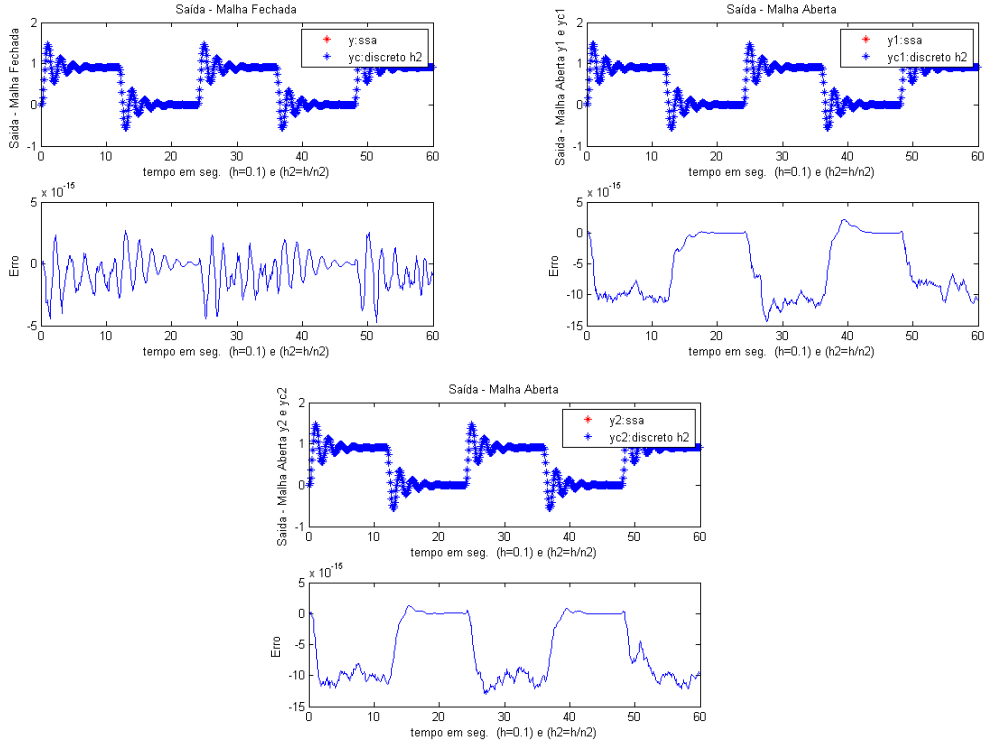


Figura A.14: Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de estados aumentado sem atraso e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2 .

A.1.2.4 Análise da Resposta em Frequência dos Modelos Discreto Superamostrado e em Espaço de Estados com Atraso Fixo

A Figura A.19 apresenta os diagramas de Bode dos modelos discreto superamostrado com $h_2 = h/10$ e em espaço de estados com vetor aumentado (com ganho $K_c = 10$ e atraso nulo). A Tabela A.4 indica os valores de margem de fase, da frequência de cruzamento de fase e do atraso máximo fixo suportado pelo sistema.

Observa-se que tanto o modelo em espaço de estado com vetor aumentado quanto o modelo discreto superamostrado apresentam margens de fase próximas a do sistema contínuo com ZOH. Entretanto, para o caso do modelo discreto se aumentarmos o número de subamostras uma melhor precisão é obtida, conforme mostrado na Tabela A.4 para $h_2 = h/100$.

A Figura A.20 apresenta os diagramas de Bode dos modelos com atraso cons-

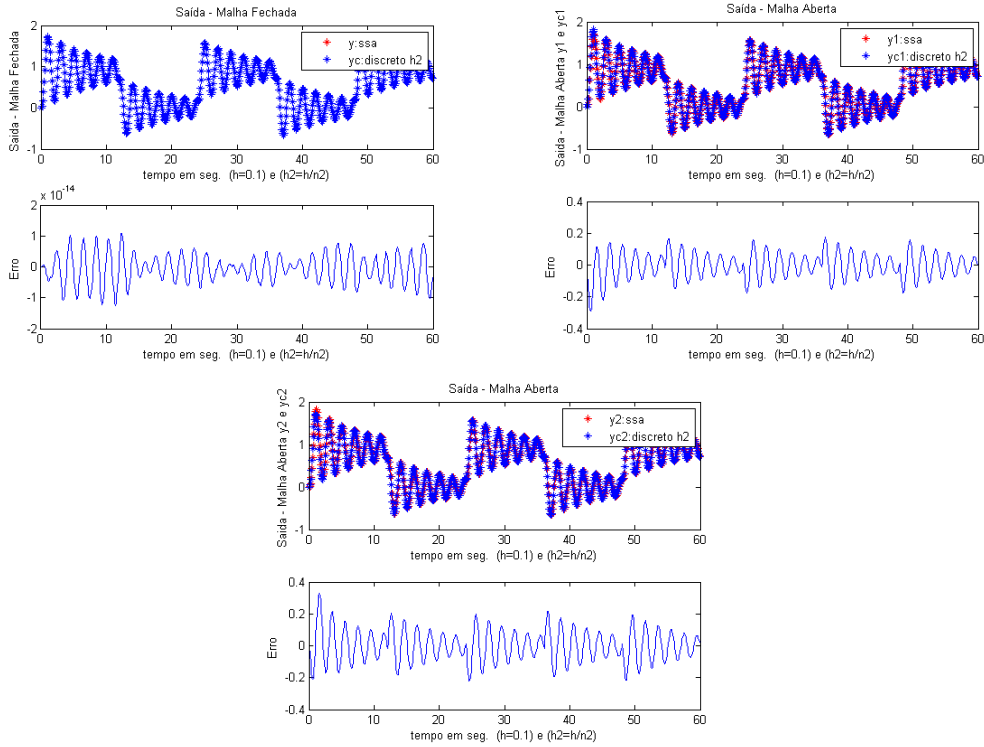


Figura A.15: Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de estados aumentado com atraso constante $0.8h$ e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2 .

tante igual a $0.8h$ e a Tabela A.5 mostra as margens de fase e de ganho e o atraso máximo fixo que pode ser suportado além de $0.8h$.

Ressalta-se que os modelos apresentam características de margem de fase bem próximas da planta contínua com ZOH, entretanto, o modelo superamostrado apresenta margens ligeiramente menor, o que pode introduzir um pequeno grau de conservadorismo nos limites de estabilidade se este for o critério analisado.

A.1.2.5 Avaliação do Erro das Aproximações no Cálculo da Exponencial de Matrizes e^{At}

Sabe-se que no projeto teórico e nas simulações de um controlador são assumidas certas simplificações e aproximações que, na prática, podem comprometer o desempenho do sistema em malha fechada. Esse comprometimento depende do ferramental teórico utilizado e do grau de conhecimento que se tem do sis-

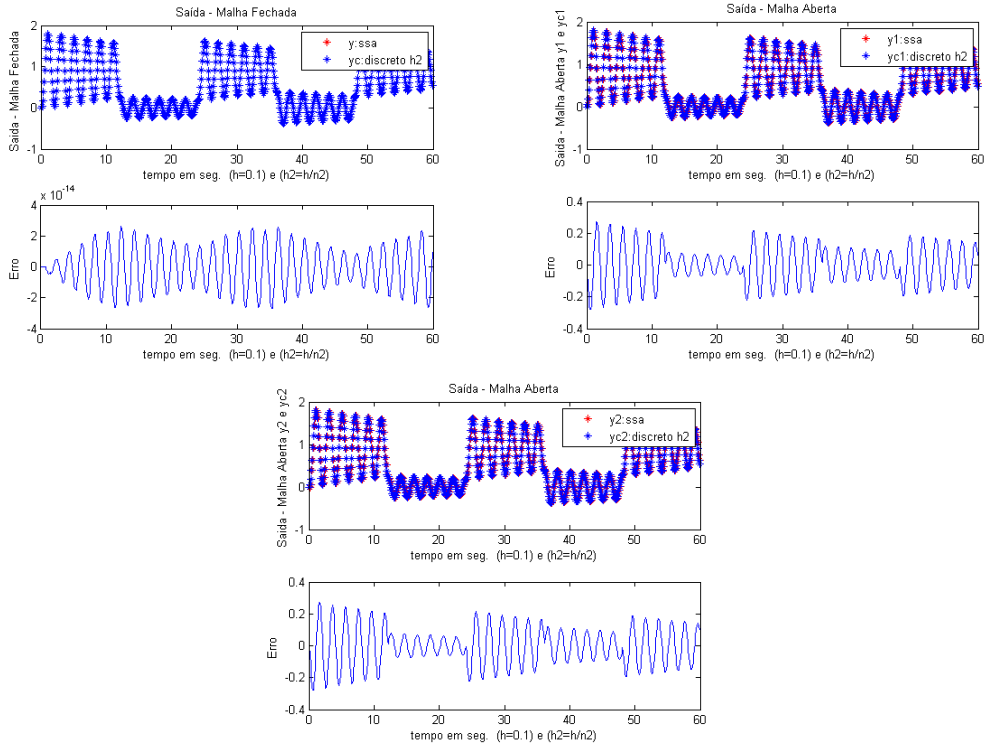


Figura A.16: Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de estados aumentado com atraso constante $1h$ e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2

tema. Uma aproximação tipicamente adotada é no cálculo da exponencial de matrizes. Na prática considerações de eficiência e estabilidade computacional indicam que alguns métodos são preferíveis em relação a outros, entretanto, nenhum é completamente satisfatório [Loan e Moler, 2003]. Ao se avaliar um algoritmo deve-se preocupar com a generalidade, confiabilidade, precisão, estabilidade, eficiência, os requisitos de armazenamento, facilidade de utilização e simplicidade. Em [Loan e Moler, 2003] são discutidos 19 métodos utilizados para computar a exponencial de matrizes. Entretanto, segundo os autores afirmar qual é o melhor método é muito arriscado. Se não tem o conhecimento suficiente sobre a sensibilidade do problema original e o conhecimento detalhado sobre o desempenho em implementações cuidadosas de vários métodos para tirar conclusões firmes [Loan e Moler, 2003].

As conclusões apresentadas em [Loan e Moler, 2003] reafirma a importância

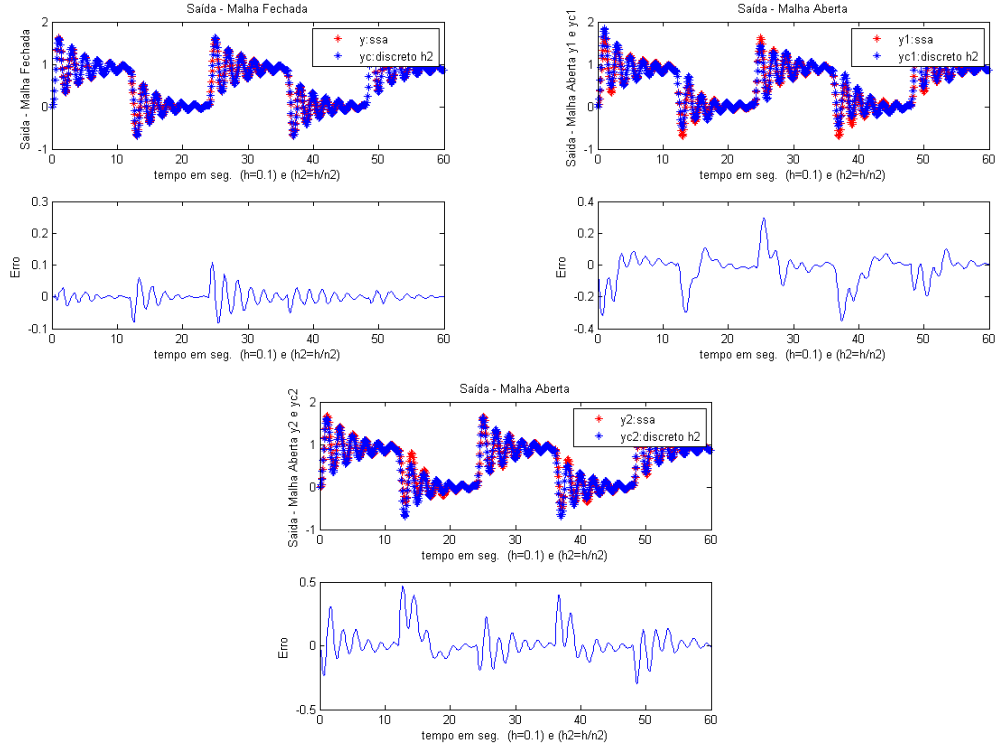


Figura A.17: Resposta da planta discreta em h_2 e do modelo em espaço de estados aumentado com atraso variável 0-1h e $K_c=10$ (a) MF (b) MA y_1 (c) MA y_2

de se avaliar detalhadamente o efeito das aproximações no problema original (no nosso caso na malha fechada). Portanto, esta seção foi proposta visando avaliar o efeito dos erros de aproximação na malha fechada.

Para avaliação dos erros de aproximação no cálculo da exponencial de matrizes utilizou-se o Método de Cayley-Hamilton como referência. Adotou-se a matriz

$$A = \begin{pmatrix} -1.5 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \text{ como exemplo para avaliação dos erros obtidos no cálculo da exponencial } e^{At} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix}, \text{ com os seguintes métodos:}$$

- Série de Potências Truncada

$$e^{At} = I + At + \frac{A^2 t^2}{2} + \frac{A^3 t^3}{3} + \dots + \frac{A^n t^n}{n}$$

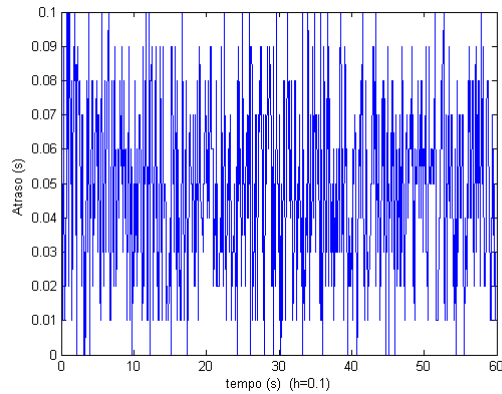


Figura A.18: Atraso variável 0-1h.

Tabela A.3: Erros Modelo Espaço de Estados

Saída	Atraso	Erro Médio	Desvio Padrão	Erro Máximo
y MF	nulo	-5.60634e-16	1.3248e-15	2.6645e-15
y MF	0.8h	-5.8064e-16	4.6604e-15	1.0880e-14
y MF	h	-6.5001e-16	1.3735e-14	2.6229e-14
y MF	variável 0-1h	-1.2434e-4	0.0215	0.1071
y1 MA	nulo	-5.7994e-15	4.8968e-15	2.2065e-15
y1 MA	0.8h	-0.0042	0.08243	0.1732
y1 MA	h	-7.5591e-4	0.1189	0.2712
y1 MA	variável 0-1h	-0.0228	0.0956	0.2976
y2 MA	nulo	-5.9174e-15	4.9696e-15	1.3357e-15
y2 MA	0.8h	0.0021	0.1014	0.3285
y2 MA	h	-7.8921e-4	0.1189	0.2712
y2 MA	variável 0-1h	0.01885	0.1122	0.4679

- Aproximação de Padé com algoritmo de escalonamento e quadratura [Higham, 2009]

$$e^{At} = \expm(At)$$

Utilizou-se a função $\expm$, nesta função um algoritmo que explora a escala e a relação de quadratura ($e^A = (e^{A/q})^q$) é adotado. A matriz A é escalonada por uma potência de 2 para reduzir a norma, é calculada a aproximação de Padé da matriz escalonada e em seguida iterativamente calcula-se os quadrados para reduzir o efeito da escala.

- Jordan

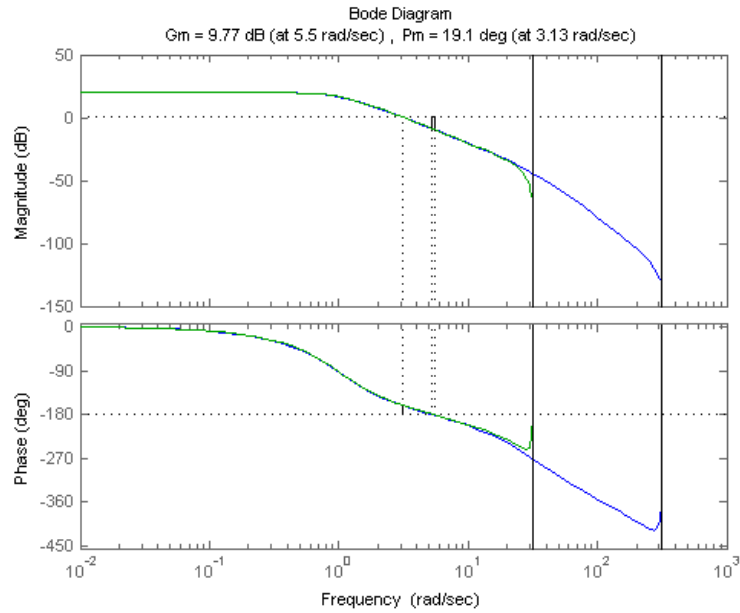


Figura A.19: Diagramas de Bode: modelo em espaço de estados aumentado (verde) e discreto superamostrado $h_2=h/10$ (azul) e atraso nulo.

$$e^{At} = e^{QJtQ^{-1}} = Qe^{Jt}Q^{-1} = Q * \text{diag}(e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}) * Q^{-1}$$

sendo

$$A = QJQ^{-1}$$

onde Q é uma matriz que contém os autovetores generalizados de A e $J=\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$ é a matriz bloco diagonal de Jordan.

- Cayley-Hamilton

$$e^{At} = \alpha_0 I + \alpha_1 A$$

sendo

$$\begin{cases} e^{\lambda_1 t} = \alpha_0 I + \alpha_1 A \\ e^{\lambda_2 t} = \alpha_0 I + \alpha_1 A \end{cases}$$

resolvendo para α_0 e α_1 , temos:

Tabela A.4: Resposta em frequência dos modelos analisados com $K_c=10$ e atraso nulo.

Modelo	Pm (°) / (Wcp rad/s)	Gm (db) / (Wcg rad/s)	Atraso Máximo (s) $\frac{Pm}{Wcp*(180/\pi)}$
Contínuo+ZOH	19.1° (3.13 rad/s)	9.76 db (5.5 rad/s)	0.106
Discreto $h_2 = h/10$	18.3° (3.13 rad/s)	8.94 db (5.25 rad/s)	0.102
Discreto $h_2 = h/100$	19.1° (3.13 rad/s)	9.68 db (5.47 rad/s)	0.106
ss aumentado	19.1° (3.13 rad/s)	9.77 db (5.5 rad/s)	0.106

Tabela A.5: Resposta em frequência modelos analisados com $K_c = 10$ e atraso constante 0.8h.

Modelo	Pm (°) / (Wcp rad/s)	Gm (db) / (Wcg rad/s)	Atraso Máximo (s) $\frac{Pm}{Wcp*(180/\pi)}$
Contínuo+ZOH	4.81° (3.13 rad/s)	1.58 db (3.43 rad/s)	0.026
Discreto $h_2 = h/10$	3.91° (3.13 rad/s)	1.26 db (3.37 rad/s)	0.022
Discreto $h_2 = h/100$	4.72° (3.13 rad/s)	1.54 db (3.42 rad/s)	0.026
ss aumentado	4.82° (3.13 rad/s)	1.58 db (3.43 rad/s)	0.026

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t}}{1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \\ \alpha_1 = \frac{\alpha_0 - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} \end{cases}$$

A seguir é apresentado o resultado do cálculo da exponencial e^{Ah} e o erro entre os métodos e o de Cayley Hamilton calculado para o primeiro elemento da matriz.

- Cayley-Hamilton (Tempo de Execução 1.11 s)

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= 0.85618475064383517932556273979256 \\ &+ 1.9601255718967915035277685943583 * 10^{-41} * i \\ a_{1,2} &= -0.092706715466760932750561126793355 \\ &+ 1.9524687136254033753001669882189 * 10^{-41} * i \end{aligned}$$

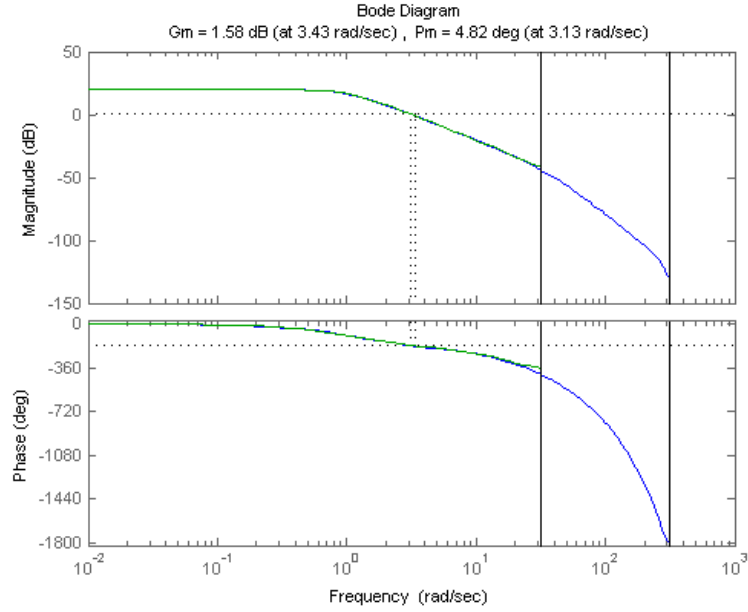


Figura A.20: Diagramas de Bode: modelo em espaço de estados aumentado (verde) e discreto superamostrado $h_2 = h/10$ (azul) e atraso constante 0.8h.

$$\begin{aligned}
 a_{2,1} &= 0.092706715466760932750561126793355 \\
 &\quad -1.9524687136254033753001669882189 * 10^{-41} * i \\
 a_{2,2} &= 0.9952448238439765784514044299826 - \\
 &\quad 9.6857749854131355942248188796999 * 10^{-42} * i
 \end{aligned}$$

- Jordan (Tempo de Execução 3.23 s)

$$\begin{aligned}
 a_{1,1} &= 0.85618475064383525729994062203332 \\
 a_{1,2} &= -0.092706715466761013821894721331773 \\
 &\quad -0.000000000000000055511151231257827021181583404541 * i \\
 a_{2,1} &= 0.092706715466761097088621568218514 \\
 a_{2,2} &= 0.99524482384397672252163147277315
 \end{aligned}$$

- Aproximação de Padé com algoritmo de escalonamento e quadratura (Tempo de Execução 0.23 s)

$$\begin{aligned}
a_{1,1} &= 0.85618475064383525729994062203332 \\
a_{1,2} &= -0.092706715466760972188531297888403 \\
a_{2,1} &= 0.092706715466760930555167874445033 \\
a_{2,2} &= 0.9952448238439766114993290102575
\end{aligned}$$

- Série de Potências Truncada 5 termos (Tempo de Execução 0.23 s)

$$\begin{aligned}
a_{1,1} &= 0.85611062499999990293986229517031 \\
a_{1,2} &= -0.092905916666666657488526936958806 \\
a_{2,1} &= 0.092905916666666657488526936958806 \\
a_{2,2} &= 0.99546949999999989611154660451575
\end{aligned}$$

- Série de Potências Truncada 2 termos (Tempo de Execução 0.63 s)

$$\begin{aligned}
a_{1,1} &= 0.85625 \\
a_{1,2} &= -0.0925 \\
a_{2,1} &= 0.0925 \\
a_{2,2} &= 0.995
\end{aligned}$$

A Tabela A.6 apresenta a diferença entre o elemento $a_{1,1}$ calculado por meio de Cayley-Hamilton e pelos demais métodos.

Tabela A.6: Diferença entre Elemento $a_{1,1}$

Método	Erro
Jordan	$-1.110223024625157 * 10^{-16} + 1.960125571896792 * 10^{-41} * i$
Padé	$-1.110223024625157 * 10^{-16} + 1.960125571896792 * 10^{-41} * i$
Série de Potências 2 termos	$-6.524935616480931 * 10^{-5} + 1.960125571896792 * 10^{-41} * i$
Série de Potências 5 termos	$7.412564383524334 * 10^{-5} + 1.960125571896792 * 10^{-41} * i$

A Figura A.21 apresenta a resposta do modelo em espaço de estados com vetor aumentado com a utilização dos métodos de Cayley Hamilton, Jordan e expm comparada com a resposta do modelo discreto superamostrado. Os erros do modelo são apresentados na Tabela A.7.

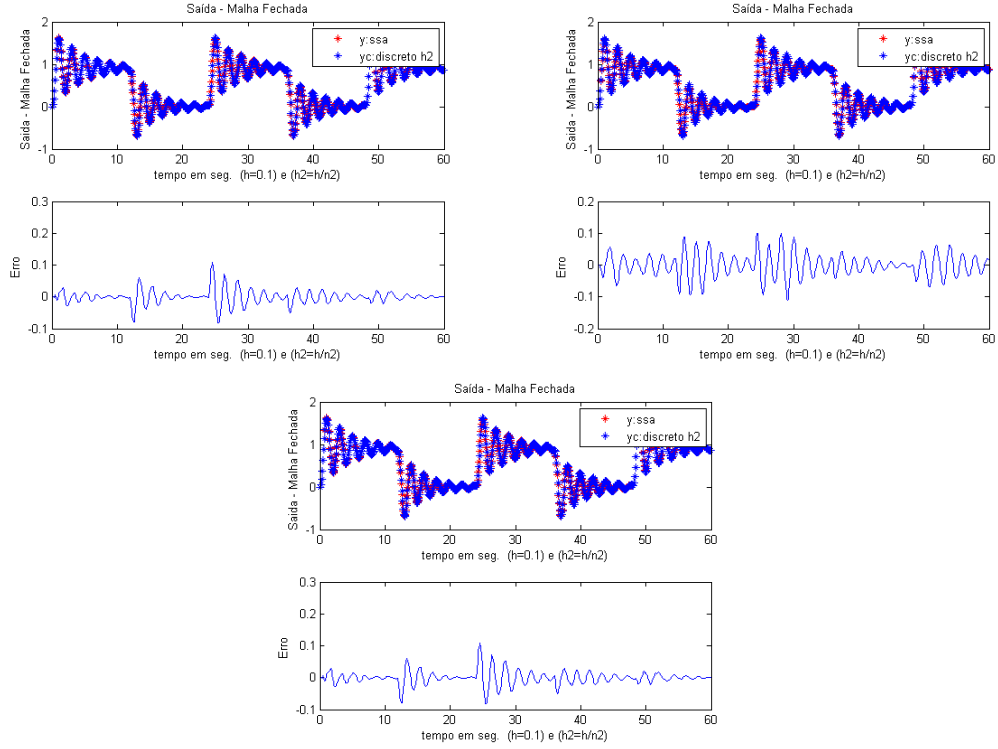


Figura A.21: Modelo discreto em h_2 e ssa com atraso variante $K_c=10$ (a) Cayley Hamilton (b) Jordan (c) Exp.

A aproximação de Jordan apresenta um erro médio ligeiramente superior, entretanto o tempo de execução é consideravelmente maior (cerca de 3 vezes maior que Cayley Hamilton e 14 vezes maior que a aproximação de Padé com algoritmo de escalonamento).

Embora em alguns dos exemplos de artigos na literatura simulados a seguir, os autores tenham utilizado o truncamento de série de potências. Esta opção não é a mais conveniente devido a necessidade de um grande número de termos para obtenção de uma aproximação razoável. Já as aproximações de Jordan e Padé apresentam erros da mesma ordem de grandeza com tempo de execução para o cálculo de Jordan superior, de acordo com cada aplicação a viabilidade de utilização de cada aproximação deve ser avaliada. O método de Cayley-Hamilton se limita a resolução disponível.

Ressalta-se a importância de se avaliar o impacto dos erros de aproximação na

Tabela A.7: Erros Modelo Espaço de Estados Aproximações $K_c=10$ atraso variável

Saída	Erro Médio	Desvio Padrão	Erro Máximo
Cayley	$-1.243440482403461 * 10^{-4}$	0.021598704054758	0.107183807658536
Jordan	$-9.536752615108837 * 10^{-4}$	0.036782305434442	0.100388512535692
Padé	$-1.243440482403431 * 10^{-4}$	0.021598704054757	0.107183807658535

malha fechada, pois ao longo do tempo se os erros forem crescentes poderá levar a condição de análise de estabilidade divergentes da planta real o que é crítico.

A.1.3 Validação dos Modelos em um NCS Real

Para validação dos modelos discreto superamostrado e em espaço de estados com vetor aumentado em um NCS real, utilizou-se a Planta A1 (Tabela A.1) com um controlador PI na rede de testes do LCPI, utilizou-se o controlador remoto descrito no Capítulo 3. Para o cálculo da exponencial de matrizes no modelo em espaço de estados aumentado utilizou-se a função *expm* do software Matlab.

A figura A.22 apresenta a resposta do sistema real e dos modelos e os erros dos modelos em espaço de estados com vetor aumentado e discreto supermaostrado, ressaltando-se que os atrasos observados na rede foram mínimos (média em torno de 40 ms) se comparado com a amostragem utilizada (5 s) e os modelos apresentaram erros máximos de aproximadamente $\pm 5\%$ com amplitude das oscilações um pouco superior aos dados reais. A Figura A.23 apresenta os atrasos medidos na rede e o histograma dos atrasos.

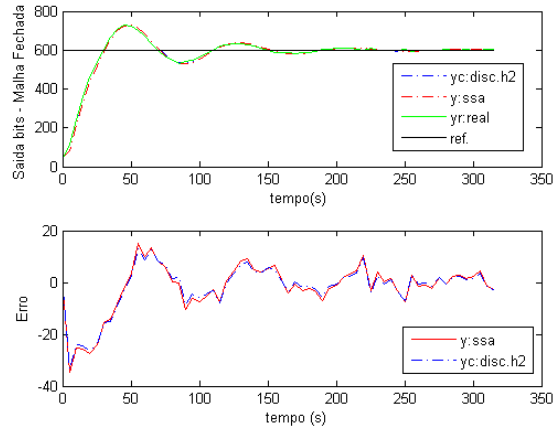


Figura A.22: Validação dos modelos discreto superamostrado e ssa.

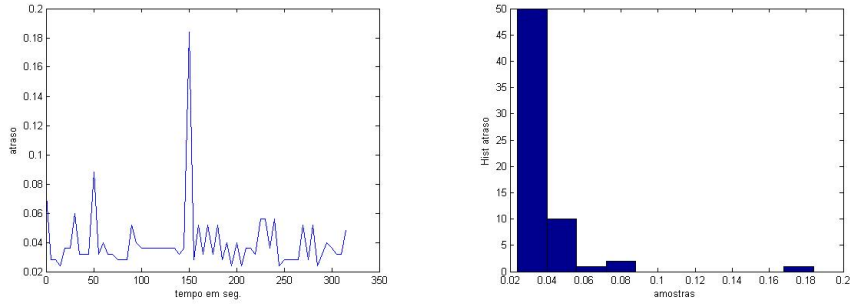


Figura A.23: Atrasos na rede (a) atraso e (b) histograma.

A.2 Considerações Finais

A partir dos resultados preliminares apresentados nesta seção pode-se perceber que tanto o modelo discreto superamostrado, quanto o modelo em espaço de estados com vetor aumentado representa satisfatoriamente a planta nas condições analisadas sem nenhuma incerteza além do atraso. Se restringirmos aos casos em que o modelo é válido é possível utilizar estas formulações para análise de estabilidade. Se a planta for diferente é necessário avaliar a validade do modelo para cada caso. O custo computacional devido à super amostragem, deve ser avaliado em cada caso.

Baseado nos resultados do estudo simulado realizado verificou-se que:

- os modelos discreto superamostrado e em espaço de estado com vetor au-

mentado representaram satisfatoriamente a planta nas condições analisadas;

- as aproximações no cálculo de exponencial de matrizes usando série de potências truncada apresenta erro bem superior aos métodos de Jordan e Cayley Hamilton e requer um número muito grande de termos para uma aproximação satisfatória;

Apêndice B

Estudo Simulado sobre Análise de Estabilidade de NCS

Neste capítulo um estudo simulado sobre questões relativas a análise de estabilidade de NCS é apresentado. É realizada a análise de estabilidade baseada em métodos determinísticos usando a teoria de Lyapunov e abordagem politópica, na qual se assume que os parâmetros incertos (neste caso, os atrasos) $\tau_k \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ em que $\tau \in \beta_p$, sendo β_p um politopo que define os valores admissíveis das incertezas. Alguns resultados foram reproduzidos de artigos da literatura e usados para motivação do estudo e para permitir uma base de comparação entre as ferramentas atuais e a estratégia de análise de estabilidade proposta. Os métodos determinísticos para análise de estabilidade baseados na teoria de Lyapunov e com uso de modelos politópicos usando Intervalo de Matrizes (ou seja, através de uma combinação convexa dos valores extremos assumidos pela incerteza, que neste caso é o atraso) e o método de *Gridding* com limitante em norma, com uso de função de Lyapunov quadrática e soluções via LMIs são analisados. A idéia básica da formulação via LMI é descrever o problema de controle como sendo problemas convexos de programação semidefinida, ou seja, problemas de otimização convexa que minimizam uma função objetivo linear de um vetor de variáveis de decisão sujeito a restrições lineares [Boyd et al., 1994].

Para as simulações usadas neste capítulo foram utilizadas as Plantas A2-A4

apresentadas na tabela A.1.

B.1 Efeito dos Atrasos Periódicos: Exemplo 1

Optou-se por simular o exemplo proposto em [Cloosterman et al., 2006] como motivação para análise preliminar da influência dos atrasos periódicos na estabilidade do sistema. Neste exemplo, utilizou-se um modelo para motor e rolo (trilho) de uma impressora dado pela Eq.B.1 (Planta A4 - Tabela A.1).

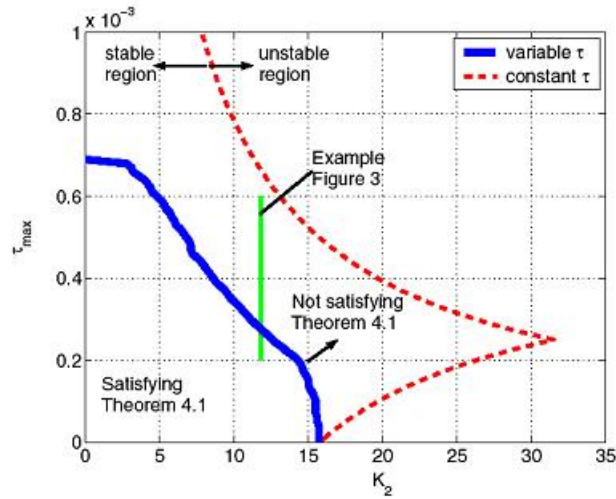


Figura B.1: Região de Estabilidade [Cloosterman et al., 2006].

$$\ddot{x}_s = \frac{nr_p}{J_M + n^2 J_p} u \quad (\text{B.1})$$

sendo $J_M = 1.95 \times 10^5 \text{ kgm}^2$ a inércia do motor, $J_p = 6.5 \times 10^5 \text{ kgm}^2$ a inércia do rolo, $r_p = 14 \text{ mm}$ o raio do rolo, $n = 0.2$ a relação de transmissão entre o motor e o rolo, x_s a posição da folha e u o torque do motor.

Adotou-se um controlador de realimentação de estados dado por $u_k = -Kx_k$ (sendo $K = [K_1, K_2]$). Considerando o período de amostragem $h = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$, obteve-se um modelo discreto em espaço de estado aumentado em malha fechada dado pela Eq.B.2.

$$\xi_{k+1} = \tilde{A}_k \xi_k \quad (\text{B.2})$$

com

$$\tilde{A}_k = \begin{bmatrix} e^{Ah} - \int_0^{h-\tau_k} e^{As} ds BK & - \int_{h-\tau_k}^h e^{As} ds BK \\ I & 0 \end{bmatrix}$$

e $\xi_k = [x_k, x_{k-1}]^T$ e $\tau_k \in [0, \tau_{max}]$ com $\tau_{max} \leq h$.

No referido exemplo o termo exponencial em $\tilde{A}_k$ foi calculado com truncamento da série de potências, resultando em:

$$\tilde{A}_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2}\alpha_a^2 K_1 b & h - \frac{1}{2}\alpha_a^2 K_2 b & \tau_k \beta K_1 b & \tau_k \beta K_2 b \\ -\alpha_a K_1 b & 1 - \alpha_a K_2 b & -\tau_k \beta K_1 b & -\tau_k \beta K_2 b \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

sendo $\alpha_a = h - \tau_k$, $\beta = \frac{1}{2}\tau_k - h$ e $b = \frac{nr_p}{J_M + n^2 J_p}$. O exemplo foi testado para atrasos constantes e periódicos com $K_1 = 50$ e $K_2 = 11.8$. Para os atrasos constantes igual a 0.2h e igual a 0.6h verificou-se que o sistema é estável nestas condições (Figura B.2). Para o atraso periódico verificou-se a instabilidade do sistema (Figura B.3). Este resultado reflete a influência da variação do atraso na estabilidade do sistema, embora o sistema seja estável para atrasos iguais a 0.2h (autovalores: 0.9915, 0.0000, -0.2814 + 0.1045i, -0.2814 - 0.1045i) e 0.6h (autovalores: 0.9915, 0.0000, -0.8174 + 0.3759i, -0.8174 - 0.3759i), para variações periódicas do atraso entre 0.2h e 0.6h o mesmo apresenta instabilidade.

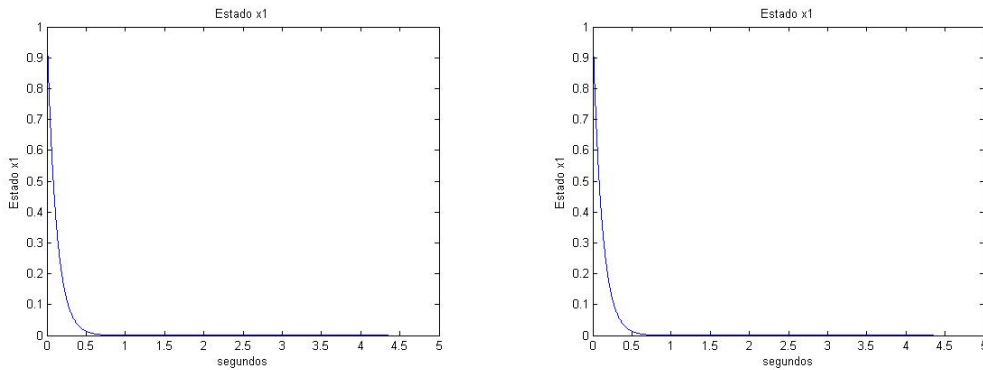


Figura B.2: Resposta do estado x_1 com atraso (a) fixo 0.2h (b) fixo 0.6h.

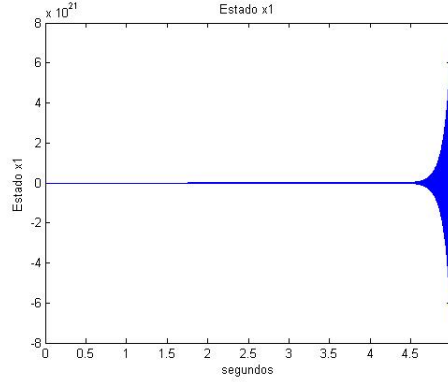


Figura B.3: Resposta do estado x_1 com atraso periódico 0.2-0.6h.

B.2 Método Intervalo de Matrizes: Exemplo 2

A proposta desta seção é a implementação do problema apresentado em [Cloosterman et al., 2006], para fins de análise da metodologia baseada em abordagem politópica proposta pelo referido autor para possível aplicação em NCSs reais.

Em [Cloosterman et al., 2006] foi analisado um sistema representado em espaço de estados aumentado (Eq. B.2) com $\tilde{A}_k$ dado pela Eq. B.3, sendo o atraso $\tau_k \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ e τ_{max} limitado a um período de amostragem.

Definiu-se um conjunto (Λ) de 2^8 matrizes ($\bar{A}$) obtidas por meio de combinação linear dos elementos de $\tilde{A}_k$, com a utilização dos valores extremos do atraso τ_{min} e τ_{max} .

$$\Lambda = \{\bar{A} \in R^{n \times n}\}$$

Se existir a solução para a equação discreta de Lyapunov (Eq. B.4) para todo $\bar{A} \in \Lambda$, então o sistema B.2 será globalmente assintoticamente estável. A prova é apresentada em [Cloosterman et al., 2006].

$$\begin{aligned} P &= P^T \geq 0 \\ \bar{A}^T P \bar{A} - P &\leq 0, \forall \bar{A} \in \Lambda \end{aligned} \tag{B.4}$$

Adotou-se o controlador de realimentação de estados com ganhos $K=[50 \ 11.8]$,

considerando o politopo de 256 vértices obteve-se $\tau_{max}=0.25h$. A região de estabilidade é apresentada na Figura B.1. Na Figura B.4 é apresentado dois resultados para região estável e instável.

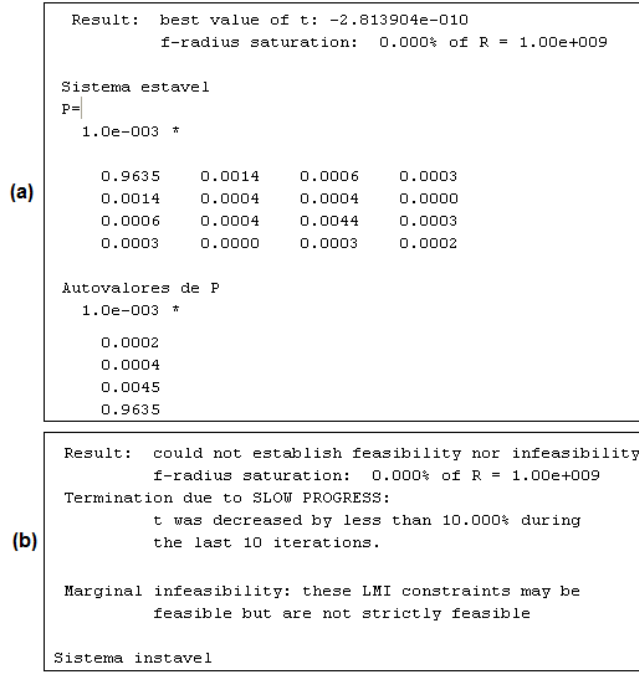


Figura B.4: Retorno do programa exemplo 2 $K_2 = 11.8$ e atraso máximo (a) 0.2h (b) 0.4h.

As simulações refletem que a metodologia aplicada ao exemplo proposto por [Cloosterman et al., 2006] foram reproduzidas adequadamente e podem ser utilizadas também em outras plantas para análise do conservadorismo se comparado com outros métodos.

B.2.0.1 Efeito da Redução do Número de Vértices

Ressalta-se que o objetivo do estudo apresentado neste capítulo é analisar as ferramentas publicadas na literatura para possível aplicação em um NCS real e portanto as metodologias foram simuladas como proposto nos trabalhos publicados. Embora em [Cloosterman et al., 2006] (exemplo apresentado na seção anterior) tenha sido utilizado 256 vértices (o que é sabidamente conservador),

existe apenas um parâmetro incerto τ_k sendo portanto possível reduzir o número de vértices para até 2^1 vértices. Fazendo uma representação ainda conservadora, é possível pensar que τ_k e τ_k^2 seja dois parâmetros independentes resultando em um politopo de 2^2 vértices. Uma análise foi realizada utilizando 4 vértices para o exemplo apresentado em [Cloosterman et al., 2006] com os ganhos de realimentação de estados iguais a $K=[50 \ 11.8]$. Para análise considerando o politopo de 256 vértices obteve-se $\tau_{max}=0.25h$ e para o politopo de 4 vértices $\tau_{max}=0.53h$, sendo este valor menos conservador conforme ilustrado na Figura B.1 (próximo de 0.7h) e ainda bem inferior a um período de amostragem.

B.3 Método Intervalo de Matrizes: Exemplo 3

O método de intervalo de matrizes conforme proposto em [Cloosterman et al., 2006] foi aplicado na Planta A2 (Tabela A.1) com $K_c = 10$ e $h = 0.1$ segundos. Porém, o cálculo da exponencial de matrizes foi feito utilizando aproximação de Padé com algoritmo de escalonamento e quadratura (expm) ao invés do truncamento com série de potências; uma vez que, a utilização da série de potências requer um grande número de termos para obtenção de uma aproximação razoável, conforme discutido no Apêndice A.

Para esta condição ($K_c = 10$) o critério da margem de fase para atrasos invariantes no tempo retorna um atraso máximo de 0.106 segundos (1.06h) conforme apresentado na Tabela A.4. O método intervalo de matrizes retornou sistema estável para atrasos entre 0 e 0.065 segundos (0.65h).

A resposta em malha fechada com atrasos variantes com distribuição uniforme entre 0 e 0.065 s (Figura B.6) do modelo em espaço de estados com vetor aumentado é apresentada na Figura B.5, a resposta amortecida reflete o conservadorismo do método.

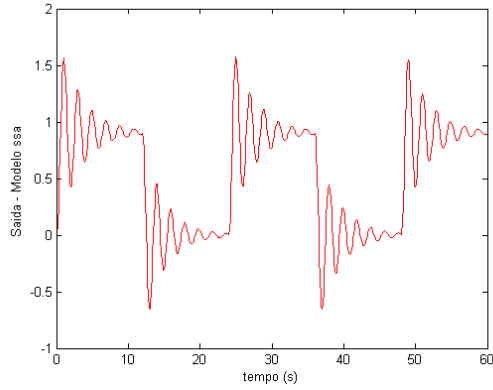


Figura B.5: Exemplo 2: Resposta do modelo sujeito a atrasos variantes entre 0 e 0.065 s (0.65h).

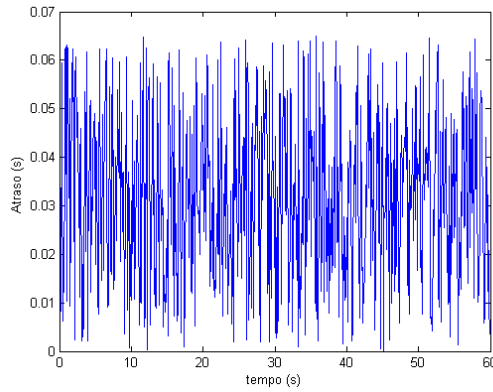


Figura B.6: Exemplo 2: Atrasos variantes entre 0 e 0.065 s (0.65h).

B.3.0.2 Efeito da Redução do Politopo

Se reduzirmos os limites dos atrasos mínimos e máximos, considerando o intervalo entre $[0.087, 0.106]$ o método de intervalo de matrizes retorna sistema estável conforme apresentado na Figura B.7.

Este resultado reflete o conservadorismo da região de estabilidade para esta aplicação. Neste método usando a representação politópica, o atraso variante no tempo pode assumir qualquer valor entre os limites mínimo e máximo estabelecidos ($\tau_k \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$), incluindo o caso $\tau_k = \tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ com τ constante,

```

Result: best value of t:   -0.017064
       f-radius saturation: 0.013% of R = 1.00e+009

topt =

    -0.017063788570181

P=
    1.0e+005 *

    0.089652625234189    0.067970218646036    0.006744417713397
    0.067970218646036    1.267607685404985    0.026698403721628
    0.006744417713397    0.026698403721628    0.003311363468936

autovalores_P =

    1.0e+005 *

    0.002410644080483
    0.086067958402157
    1.272093071625469

tkmin= 0.087, tkmax= 0.106

```

Figura B.7: Exemplo 2: Intervalo de matrizes efeito da redução do politopo.

ou seja, o atraso pode até permancer em um dado valor constante dentro do intervalo. Entretanto, em NCS reais a probabilidade do atraso permanecer fixo em um dado valor é muito pequena, como pode ser visto nos dados de atrasos medidos em NCS reais apresentados no capítulo 3.

B.4 Método de Gridding com Limitante em Norma:

Exemplo 4

Nesta seção será apresentado o exemplo proposto em [Heemels et al., 2010] aplicado à Planta A3 (Tabela A.1) utilizando um modelo politópico baseado no método de *Gridding* com limitante em norma e com atrasos variantes limitados a um período de amostragem. A estabilidade é avaliada usando a função de Lyapunov quadrática padrão.

A incerteza do modelo de NCS (Equação A.3) é representado na matriz $\Gamma(\tau_k)$. A matriz $\Gamma(\tau_k) \in \mathbf{\Gamma}$ com:

$$\mathbf{\Gamma} := \{\Gamma(\tau) | \tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]\} \quad (\text{B.5})$$

O conjunto de matrizes $\mathbf{\Gamma}$ é sobreaproximado, usando uma estrutura politópica com incerteza limitada em norma, como:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Gamma} &\subseteq \{\sum_{i=1}^{N_g} \alpha_i [\mathbf{F}_i + \mathbf{G}_i \mathbf{\Delta} \mathbf{H}_i]\} \\ \text{com } \alpha &= [\alpha_1, \dots, \alpha_{N_g}]^T \in A_\alpha, \mathbf{\Delta} \in \mathbf{\Delta} \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

sendo F_i, G_i e H_i matrizes construídas com dimensão apropriada, $i = 1, \dots, N_g$ com N_g o número de vértices da sobreaproximação politópica, $\mathbf{\Delta}$ um conjunto específico de matrizes com limitante em norma ($\|\mathbf{\Delta}\| = \sqrt{\lambda_{max}(\mathbf{\Delta}^T \mathbf{\Delta})} \leq 1$) e

$$A_\alpha = \{\alpha \in R^{N_g} | \alpha_i \geq 0 \text{ e } \sum_{i=1}^{N_g} \alpha_i = 1\} \quad (\text{B.7})$$

Se uma sobreaproximação do conjunto de matrizes $\mathbf{\Gamma}$ está disponível, então o sistema A.3 pode ser embutido em um novo sistema politópico com estrutura incerta dado por:

$$\xi_{k+1} = \sum_{i=1}^{N_g} \alpha_{ki} \left\{ \begin{bmatrix} e^{Ah} & \int_0^h e^{A\tau} d\tau B - F_i - G_i \mathbf{\Delta}_k H_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \xi_k + \begin{bmatrix} F_i - G_i \mathbf{\Delta}_k H_i \\ I \end{bmatrix} u(k) \right\} \quad (\text{B.8})$$

Em [Heemels et al., 2010] as técnicas de sobreaproximação baseadas na forma real de Jordan, teorema de Cayley-Hamilton, série de Taylor e método de *Gridding* com limitante em norma são comparadas. O método de Jordan apresentou maior conservadorismo. O método de *Gridding* com limitante em norma foi o que apresentou condições mais favoráveis em termos de complexidade numérica e conservadorismo e portanto foi escolhido para ser implementado.

No referido método utiliza-se a idéia de *grid* para obter $F_i = \Gamma(\tilde{\tau}_i)$, sendo $\tilde{\tau}_i$ os pontos de *grid* escolhidos entre $[\tau_{min}, \tau_{max}]$. É utilizado uma incerteza aditiva limitada em norma $\mathbf{\Delta}$ para capturar os erros de aproximação entre o sistema original com $\Gamma(\tau)$ e o politopo $Co\{F_1, \dots, F_{N_g}\}$.

Se B.6 é assegurada para todo $\tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ tal que:

$$\Gamma(\tau) - \sum_{i=1}^{N_g} \alpha_i F_i = \sum_{i=1}^{N_g} \alpha_i G_i \Delta H_i \quad (B.9)$$

Então pode-se obter a distância no pior caso entre $\Gamma(\tau)$ e $Co\{F_1, \dots, F_{N_g}\}$ como limite superior do erro da aproximação. Para obter estes limites escolhe-se N_g pontos de *grid* e particiona-se o intervalo $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ em N_g seguimentos de linha e computa os limites de incerteza para cada segmento de linha.

Os passos para implementação do Método de *Gridding* com limitante em norma são descritos em [Heemels et al., 2010] e consiste de:

- 1. Selecione o número de pontos de grid N_g , para particionar o intervalo $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ em m segmentos de linha S_m com $m = 1, \dots, N_g - 1$.
- 2. Selecione N_g atrasos distintos $\tau_1, \dots, \tau_{N_g}$, tal que $\tau_{min} =: \tau_1 \leq \tau_2 \leq \dots \leq \tau_{N_g} =: \tau_{max}$
- 3. Defina $F_i = \Gamma(\tau_i)$, $i = 1, \dots, N_g$
- 4. Decompõem a matriz A do sistema na forma real de Jordan, $A =: QJQ^{-1}$ sendo Q uma matriz invertível e $J = diag(J_1, \dots, J_L)$, onde J_j $j=1, \dots, L$ é cada bloco real de Jordan associado a matriz A.

- 5. Computa para cada segmento de linha S_m e para cada bloco real de Jordan J_j o erro de aproximação no pior caso, dada por (detalhes em [Heemels et al., 2010] e [Donkers et al., 2009]):

$$\tilde{\delta}_{j,m} = \max \left\| \sum_{l=1}^2 \tilde{\alpha}_l \int_{\tilde{\tau}_m+l-1}^{\tilde{\alpha}_1 \tilde{\tau}_m + \tilde{\alpha}_2 \tilde{\tau}_{m+1}} e^{J_j(h-s)} ds \right\|$$

sendo $\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 = 1$ e $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2 \geq 0$

- 6. Mapeie os limites obtidos no passo 5 em cada seguimento de linha para cada bloco de Jordan para os vértices correspondentes ($i = 1, \dots, N_g$), de acordo com:

$$\delta_{j,i} = \tilde{\delta}_{j,i} \quad \text{para } i \in [1, N_g] \quad (\text{extremos } min \text{ e } max) \quad \text{ou}$$

$$\delta_{j,i} = \max\{\tilde{\delta}_{j,i-1}, \tilde{\delta}_{j,i}\} \quad \text{para } i \in [2, \dots, N_g-1] \quad (\text{maior valor do segmento})$$

- 7. Define $H_i = Q^{-1}B$ e $G_i = \text{diag}(\delta_{1,i}I_1, \dots, \delta_{L,i}I_L)$, sendo I_j a matriz identidade de dimensão n_j compatível com a dimensão do j -th bloco de Jordan. O conjunto de incerteza aditiva Δ é dado por: $\Delta = \{\text{diag}(\Delta^1, \dots, \Delta^L) \mid \Delta^j \in R^{n_j \times n_j}, \|\Delta^j\| \leq 1\}$

Este procedimento é repetido iterativamente para os valores de ganho $K_2 = 1, \dots, 20$ e $K_1 = 3.75$.

O exemplo foi simulado com 3 pontos de *grid* conforme proposto em [Heemels et al., 2010] e utilizou-se a resolução do atraso de $h/1000$, ou seja o valor do incremento do atraso analisado foi de 0.001 segundo.

A Figura B.8 apresenta os valores dos atrasos máximos obtidos por meio do método de *Gridding* em função do ganho K_2 .

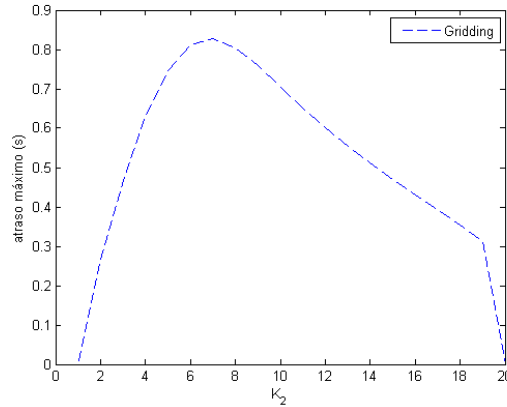


Figura B.8: Exemplo 3 - método *gridding*: atraso máximo (s) em função do ganho de velocidade K_2 .

Na Tabela B.1 são apresentados os valores do atraso máximo obtido pelo método de *Gridding* para o ganho velocidade $K_2=1, \dots, 20$.

Este resultado é utilizado no capítulo 5 para comparação das regiões de estabilidade obtidas com o método proposto.

Tabela B.1: Exemplo 3: Método de *Gridding*

K_2	Atraso Máximo	K_2	Atraso Máximo
1	0.000	11	0.652
2	0.268	12	0.602
3	0.468	13	0.555
4	0.630	14	0.511
5	0.747	15	0.470
6	0.813	16	0.431
7	0.828	17	0.393
8	0.803	18	0.355
9	0.758	19	0.313
10	0.705	20	0.001

B.5 Considerações Finais

As simulações apresentadas neste capítulo reproduzem alguns métodos de análise de estabilidade de NCS disponíveis na literatura, baseados em abordagem politópica e uso de método de Lyapunov determinísticos. Questões relativas ao conservadorismo de tais métodos é discutida no capítulo 2 e o método de *Gridding* é usado para comparação das regiões de estabilidade obtidas com a metodologia proposta no capítulo 5.

Apêndice C

Validação dos Atrasos Medidos

A Figura C.1 mostra um perfil de atrasos medidos com PCAN-View e através dos *timestamps* para a validação e a Figura C.2 a medida de uma amostra realizada com osciloscópio. Na C.1 observa-se que o erro está na faixa de 4ms que é a resolução do relógio na plataforma NCS-CMUF.

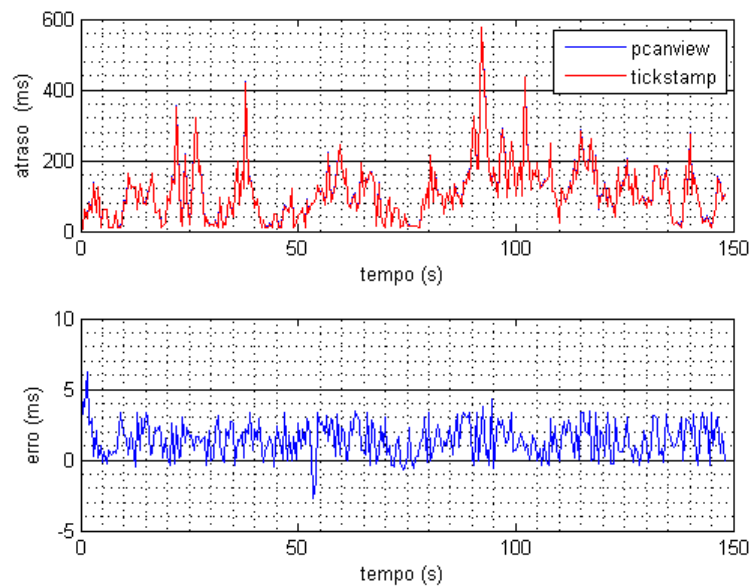


Figura C.1: Validação dos atrasos medidos com timestamp e Pcanview.

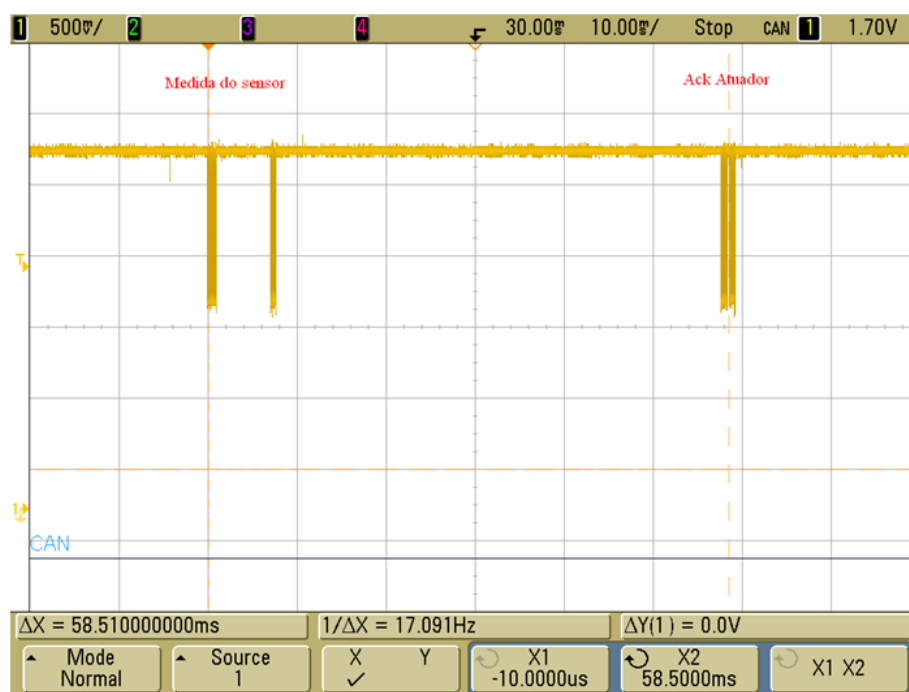


Figura C.2: Medição de uma amostra do atraso com osciloscópio.

Apêndice D

Ensaaios em um NCS Real com *Buffer* de Atraso - Filtro Passa-Baixas

A Planta 1 da Tabela A.1 com controlador PI foi utilizada para ensaios na plataforma NCS-CMUF usando o *buffer* de atrasos. A Figura D.1 mostra os atrasos medidos na rede entre a mensagem de realimentação do sensor e *ack* do atuador e o histograma dos atrasos. O atraso médio foi de 2,91 segundos e o atraso máximo de 15,45 segundos. A Figura D.2 apresenta a saída da planta controlada e o sinal de controle. Em torno da amostra 1200 o atraso foi superior a 15s e a saída da planta permanece sem oscilações.

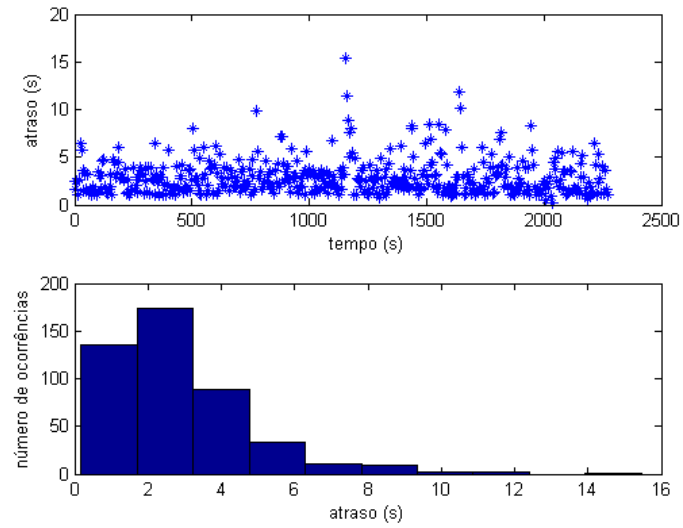


Figura D.1: Ensaio 1: atrasos medidos em NCS real com *buffer* de atrasos.

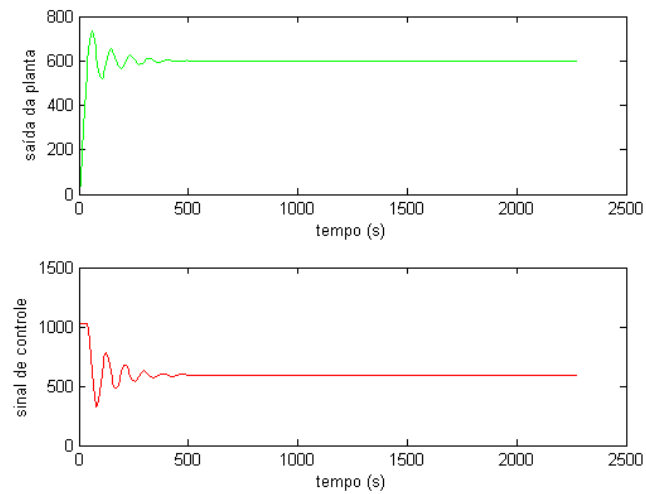


Figura D.2: Ensaio 1: saída da planta e sinal de controle medidos em NCS real com *buffer* de atrasos.

Apêndice E

Características da Câmara de Refrigeração

A Tabela E.1 apresenta as características técnicas da câmara de refrigeração F-250 da Electrolux [Eletrólux, 2000]. O freezer possui um compressor hermético da Embraco modelo FFI 7.5 HAK com um motor de indução monofásico. A Figura E.1 mostra a resposta de temperatura da câmara sob tensão nominal (127V) e tensão reduzida (85V), refletindo que a capacidade de refrigeração se mantém com a redução de tensão.

Tabela E.1: Especificações técnicas da câmara de refrigeração.

Especificação	Valor
Capacidade Armazenamento	242 L
Degelo	Manual
Largura	550 mm
Profundidade com porta fechada	628 mm
Profundidade com porta aberta	1250 mm
Peso líquido	55 kg
Frequência nominal	60 Hz
Tensão nominal	127 V
Potência nominal do motor	164W
Corrente nominal do motor	2,24A
Tensão do Motor	98-135V

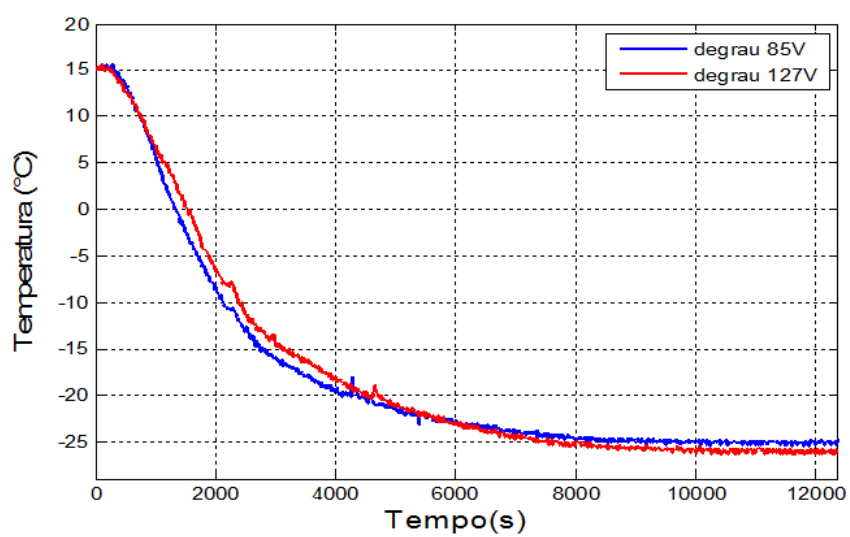


Figura E.1: Exemplo da capacidade de refrigeração mantida sob redução de tensão.

Apêndice F

Experimentos Adicionais

F.1 Câmara de Refrigeração

Um ensaio adicional realizado com controle proposto com *setpoint* igual a -15°C é apresentado nas figuras F.1 e F.2.

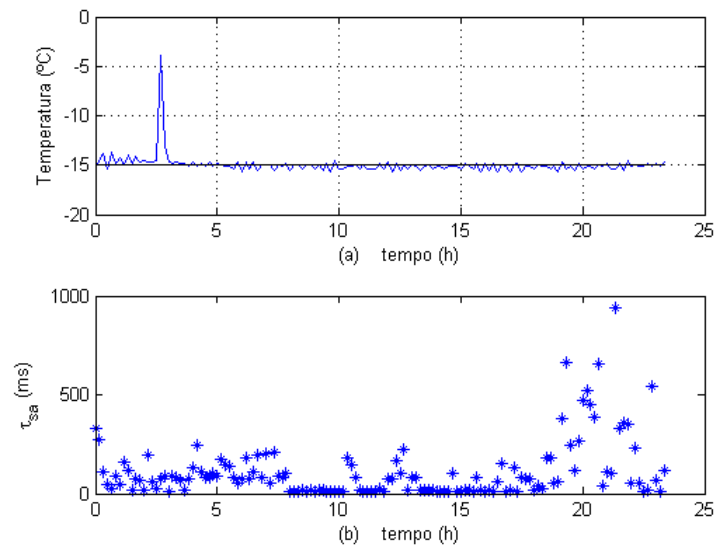


Figura F.1: Ensaio 2: (a) temperatura interna da câmara e *setpoint* igual a -15°C (b) atrasos reais medidos.

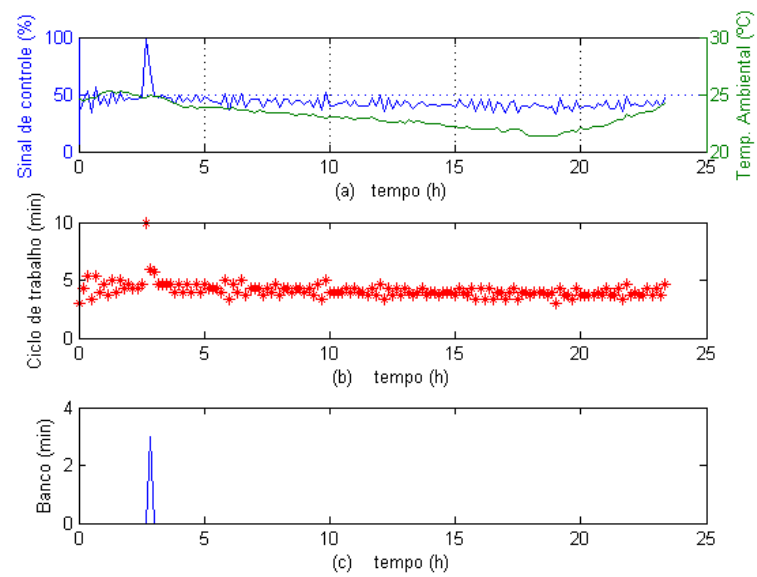


Figura F.2: Ensaio 2: (a) sinal de controle e temperatura ambiente (b) ciclo de trabalho (c) banco.

Referências Bibliográficas

- [Agilent, 2006] Agilent (2006). *Agilent 6000 series oscilloscope*. User Guide.
- [Astrom e Wittenmark, 1990] Astrom, K. e Wittenmark, B. (1990). *Computer controlled systems: theory and design*. Prentice-Hall.
- [Avila e Jota, 2011] Avila, A. e Jota, F. (2011). Operação eficiente de câmaras de refrigeração com controle híbrido a velocidades variáveis. *Anais do IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, pages 1–6.
- [Barford e Crovella, 1998] Barford, P. e Crovella, M. (1998). Generating representative web workloads for network and server performance evaluation. *In Proceedings of the 1998 International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pages 151–160.
- [Batista, 2006] Batista, A. (2006). Desenvolvimento de um sistema distribuído de monitoração e controle de processos térmicos em edificações. Dissertação de Mestrado, PPGE-UFMG, Belo Horizonte, MG.
- [Batista et al., 2006] Batista, A., Freitas, M., Martins, E., Jota, P., e Jota, F. (2006). Sistema para monitoramento e controle de usos finais. *Anais do VII Seminário Nacional da Gestão da Informação e do Conhecimento no Setor de Energia Elétrica - SINCONEE*, pages 1–10.
- [Batista e Jota, 2013] Batista, A. e Jota, F. (2013). On the effects of time delay variations in the design of networked control system. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 5(2):120–139.
- [Batista e Jota, 2014] Batista, A. e Jota, F. (2014). Effects of time delay statistical parameters on the most likely regions of stability in a NCS. *Aceito para Publicação no Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 16(1-4):1–9.
- [Bovy et al., 2002] Bovy, C., Mertodimedjo, H., Hooghiemstra, G., Uijterwaal, H., e Mieghem, P. V. (2002). Analysis of end-to-end delay measurements in internet. *In Proceedings of the Passive and Active Measurements Workshop*, pages 1–8.
- [Boyd et al., 1994] Boyd, S., Ghaoui, L., Feron, E., e Balakrishna, V. (1994). *Linear matrix inequalities in system and control theory*. SIAM Studies in Applied Mathematics.

- [Caldeira et al., 2011] Caldeira, A. F., Miranda, M. F., Leite, V. J. S., e Gonçalves, E. N. (2011). Minimização do custo H_∞ de sistemas incertos discretos no tempo com atraso nos estados. *SBA Controle e Automação*, 22(3):256–272.
- [Callahan et al., 2010] Callahan, T., Allman, M., e Paxson, V. (2010). A longitudinal view of HTTP traffic. *In Proceedings of the 11th International Conference on Passive and Active Measurement*, pages 222–231.
- [Chaillet e Bicchi, 2008] Chaillet, A. e Bicchi, A. (2008). Delay compensation in packet-switching networked controlled systems. *In Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3620–3625.
- [Chen e Wang, 2002] Chen, L. e Wang, Y. (2002). Design and implementation of web-based distributed control system. *In Proceedings of the IEEE Conferences on Electrical and Computer Engineering*, pages 681–686.
- [Chen et al., 2011] Chen, P., Ramesh, C., e Johansson, K. H. (2011). Network estimation and packet delivery prediction for control over wireless mesh networks. *In Proceedings of the 18th World Congress of The International Federation of Automatic Control - IFAC*, pages 6573–6579.
- [Chen e Zheng, 2011] Chen, W.-H. e Zheng, W. X. (2011). Input-to-state stability for networked control systems via improved impulsive system approach. *Automatica*, 47(4):789–796.
- [Chunmao e Jian, 2006] Chunmao, L. e Jian, X. (2006). Adaptive delay estimation and control of networked control systems. *In Proceedings of the IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies*, pages 707–710.
- [Cloosterman, 2008] Cloosterman, M. (2008). *Control over communication networks: modeling, analysis, and synthesis*. Tese de Doutorado, Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands.
- [Cloosterman et al., 2010] Cloosterman, M., Hetel, L., Wouw, N., Heemels, W., Daafouz, J., e Nijmeijer, H. (2010). Controller synthesis for networked control systems. *Automatica*, 46(10):1584–1594.
- [Cloosterman et al., 2006] Cloosterman, M., Wouw, N., Heemels, M., e Nijmeijer, H. (2006). Robust stability of networked control systems with time-varying network-induced delays. *In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4980–4985.
- [Cloosterman et al., 2009] Cloosterman, M., Wouw, N., Heemels, W. P. M. H., e Nijmeijer, H. (2009). Stability networked control systems with uncertain time-varying delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(7):1575–1580.

- [Coutinho, 2003] Coutinho, D. F. (2003). *Análise de estabilidade e desempenho, e síntese de controle para sistemas não lineares incertos*. Tese de Doutorado, UFSC, Santa Catarina, SC.
- [Coutinho e Trofino, 2000] Coutinho, D. F. e Trofino, A. (2000). Análise de sistemas não lineares incertos: Uma abordagem LMI. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, pages 592–597.
- [Dezong et al., 2011] Dezong, Z., Chunwen, L., e Jun, R. (2011). Fuzzy speed control and stability analysis of a networked induction motor system with time delays and packet dropouts. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 12(1):273–287.
- [Dilaneh e Laval, 2009] Dilaneh, I. e Laval, L. (2009). Stabilization of networked control systems with uncertain time-varying delays. *In Proceedings of the 17th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 610–615.
- [Doebelin, 1990] Doebelin, E. O. (1990). *Measurement systems*. McGraw Hill International.
- [Donkers et al., 2009] Donkers, M., Heemels, W., Wouw, N., e Hetel, L. (2009). Stability analysis of networked control systems using a switched linear systems approach. *In Proceedings of the 12th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, pages 150–164.
- [Donkers et al., 2011] Donkers, M., Heemels, W., Wouw, N., e Hetel, L. (2011). Stability analysis of networked control systems using a switched linear systems approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(9):2101–2115.
- [Drew et al., 2005] Drew, M., Liu, X., Goldsmith, A., e Hedrick, K. (2005). Networked control system design over a wireless LAN. *In Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, pages 6704–6709.
- [Dritsas e Tzes, 2009] Dritsas, L. e Tzes, A. (2009). Robust stability analysis of networked systems with varying delays. *International Journal of Control*, 82(12):2347–2355.
- [Du e Du, 2009] Du, W. e Du, F. (2009). New smith predictor and CMAC-PID control for wireless networked control systems. *In Proceedings of the International Conference on Software Engineering Artificial Intelligences*, pages 162–167.
- [Du et al., 2009] Du, W., Du, F., e Lei, Z. (2009). A novel smith predictor for wireless networked control systems. *In Proceedings of the IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering*, pages 667–670.
- [Eletrolux, 2000] Eletrolux (2000). *Freezer vertical F210 e F250*. Manual de Instrução.

- [Epstein et al., 2007] Epstein, M., Shi, L., e Murray, R. M. (2007). Estimation schemes for networked control systems using UDP-like communication. *In Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3945–3951.
- [Figueredo et al., 2009] Figueredo, L. F. C., Santana, P. H., Alves, E. S., Ishihara, J. Y., Borges, G. A., e Bauchspiess, A. (2009). Robust stability of networked control systems. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation*, pages 1535–1540.
- [Figueredo et al., 2010] Figueredo, L. F. C., Santana, P. H., Alves, E. S., Ishihara, J. Y., Borges, G. A., e Bauchspiess, A. (2010). Estabilidade e estabilização de sistemas de controle em rede com incertezas e atrasos variantes no tempo. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, pages 5268–5275.
- [Fridman et al., 2004] Fridman, E., Seuret, A., e Richard, J. (2004). Robust sampled-data stabilization of linear systems: An input delay approach. *Automatica*, 40(8):1441–1446.
- [Fujioka, 2009] Fujioka, H. (2009). Stability analysis of systems with aperiodic sample-and-hold devices. *Automatica*, 45(3):771–775.
- [Gao et al., 2008] Gao, H., Chen, T., e Lam, J. (2008). A new delay system approach to network-based control. *Automatica*, 44(1):39–52.
- [Gazi et al., 1995] Gazi, E., Seider, W. D., e Ungar, L. H. (1995). Controller verification for polymerization reactors. *In Proceedings of the Intelligent Systems in Process Engineering - ISPE'95*, pages 1–4.
- [Gielen e Lazar, 2009] Gielen, R. e Lazar, M. (2009). Stabilization of networked control systems via non-monotone control lyapunov functions. *In Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pages 7942–7948.
- [Gielen et al., 2008] Gielen, R., Olaru, S., e Lazar, M. (2008). On polytopic approximations as a modeling framework for networked control systems. *In Proceedings of the Workshop on Assessment and Future Directions*, pages 1–8.
- [Gielen et al., 2010] Gielen, R., Olaru, S., Lazar, M., Heemels, W., Wouw, N., e Niculescu, S. I. (2010). On polytopic inclusions as a modeling framework for systems with time-varying delays. *Automatica*, 46(3):615–619.
- [Godoy et al., 2010] Godoy, E. P., Bragato, B. N., Lulio, L. C., Porto, A. J. V., e Inamasu, R. Y. (2010). Implementação e avaliação de sistemas de controle via redes baseados no protocolo CAN-controller area network. *In Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications*, pages 178–185.
- [Goktas, 2000] Goktas, F. (2000). *Distributed control of systems over communications networks*. Tese de Doutorado, University of Pennsylvania, Pennsylvania.

- [Gonçalves, 2011] Gonçalves, A. R. (2011). Otimização em ambientes dinâmicos com variáveis contínuas empregando algoritmos de estimação de distribuição. Dissertação de Mestrado, DCA-UNICAMP, Campinas, SP.
- [Goodwin et al., 2008] Goodwin, G. C., E., Q. D., e Silva, E. I. (2008). Architectures and coder design for networked control systems. *Automatica*, 44(1):248–257.
- [Goodwin et al., 2004] Goodwin, G. C., Haimovich, H., Quevedo, D. E., e Welsh, J. S. (2004). A moving horizon approach to networked control system design. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(9):1427–1445.
- [Goodwin e Middleton, 1992] Goodwin, G. C. e Middleton, R. H. (1992). High-speed digital signal processing and control. *In Proceedings of the the IEEE*, 80(2):240–259.
- [Gungor et al., 2013] Gungor, V., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., e Hancke, G. P. (2013). A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):28–42.
- [Gupta e Chow, 2010] Gupta, R. e Chow, M. (2010). Networked control system: Overview and research trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7):2527–2535.
- [Halevi e Ray, 1988a] Halevi, Y. e Ray (1988a). Integrated communication and control systems: Part I- analysis. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 110(4):367–373.
- [Halevi e Ray, 1988b] Halevi, Y. e Ray, A. (1988b). Integrated communication and control systems: Part II- design considerations. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 110(4):374–381.
- [Heemels et al., 2010] Heemels, M., Wouw, N. V. D., Gielen, R., Doonkes, Hetel, L., Olaru, S., Lazar, M., Daafouz, J., e Niculescu, S. (2010). Comparison of overapproximation methods for stability analysis of networked control systems. *In Proceedings of the 13rd International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control - HSCC'10*, pages 181–190.
- [Hespanha et al., 2007] Hespanha, J., Naghshtabrizi, P., e Xu, Y. (2007). A survey of recent results in networked control systems. *Proceedings of the IEEE*, 95(1):138–162.
- [Hetel et al., 2006] Hetel, L., Daafouz, J., e Iung, C. (2006). Stabilization of arbitrary switched linear systems with unknown time-varying delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(10):1668–1674.
- [Higham, 2009] Higham, N. J. (2009). The scaling and squaring method of matrix exponential revisited. *SIAM Review Society for Industrial and Applied Mathematics*, 51(4):747–764.

- [Hoare, 1962] Hoare, C. A. R. (1962). Quicksort. *The Computer Journal*, 5(1):10–16.
- [Huang e Nguang, 2008] Huang, D. e Nguang, S. (2008). Robust disturbance attenuation for uncertain networked control systems. *In Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference*, pages 4173–4178.
- [Huo et al., 2009] Huo, Z., F. H., Zheng, Y., e Xu, C. (2009). Fault-tolerant control research on networked control systems with multiple-packet transmission. *In Proceedings of the Control and Decision Conference - CCDC'09*, pages 544–548.
- [Ji e Kim, 2005] Ji, K. e Kim, W. (2005). Real-time control of networked control systems via ethernet. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 3(4):591–600.
- [Júnior e Gomes, 2008] Júnior, A. e Gomes, D. (2008). Algoritmos e estruturas de dados: métodos de ordenação interna. Relatório técnico, Departamento de Computação - UFOP, Ouro Preto, MG.
- [Júnior, 2007] Júnior, P. (2007). Caracterização da rede de sincronização na internet. Dissertação de Mestrado, UFPR, Paraná, PR.
- [Jönsson et al., 2007] Jönsson, U., Kao, C., e Fujioka, H. (2007). A popov criterion for networked systems. *Systems and Control Letters*, 56(9-10):603–610.
- [Jota, 1987] Jota, F. (1987). *The application of self-tuning control techniques to a multivariable process*. Tese de Doutorado, University of Oxford, Oxford.
- [Jota et al., 2013] Jota, F., Batista, A., Jota, P., Martins, E., Herzog, M., e Venâncio, J. (2013). Effective energy management through on-line monitoring and control: a case study in cooling chambers of a blood centre. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering - SEGE'13*, pages 1–8.
- [Jota et al., 2011] Jota, F., Jota, P., Batista, A., Martins, E., Freitas, M., e Rocha, D. (2011). Monitoramento e controle contínuos e setorizados para gestão energética de hemocentros. *Anais do IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, pages 1–7.
- [Jota et al., 2002] Jota, F., Jota, P., e Nobre, E. (2002). Centro de monitoramento de usos finais. Relatório técnico, Projeto FNDCT/CT-ENERG e CEMIG, Belo Horizonte, MG.
- [Jota et al., 2009] Jota, F., Jota, P., e Nobre, E. (2009). Method and device for measuring and monitoring. *World Intellectual Property Organization, (Pub. No.: WO/2009/033246)*, *International Patent*, page 1.

- [Jota et al., 2005] Jota, F., Jota, P., Nobre, E., e Costa, H. (2005). Centro de monitoramento de usos finais. *Anais do I Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, pages 125–130.
- [Jota e Pena, 1994] Jota, F. e Pena, R. (1994). Implementação de controladores PID em computadores digitais. Relatório técnico, Curso de Extensão em Automação Industrial Petrobrás-REGAP, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- [Karakas, 2003] Karakas, M. (2003). Determination of network delay distribution over the internet. Dissertação de Mestrado, The Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- [Khan et al., 2008] Khan, A., Tilbury, D., e Moyne, J. (2008). Favorable effect of time delays on tracking performance of type-I control system. *IET Control Theory Application*, 2(3):210–218.
- [Kim et al., 2003] Kim, D. S., Lee, Y. S., Kwon, W. H., e Park, H. S. (2003). Maximum allowable delay bounds of networked control system. *Control Engineering Practice*, 11(11):1301–1313.
- [Kottenstette et al., 2008] Kottenstette, N., Koutsoukos, X., Hall, J., e Sztiapanovits, J. (2008). Passivity-based design networked control systems for robustness to time-varying delays. *In Proceedings of the Real Time Systems Symposium*, pages 15–24.
- [Kozin, 1969] Kozin, F. (1969). A survey of stability of stochastic systems. *Automatica*, 5(1):95–112.
- [Lai e Hsu, 2010] Lai, C. e Hsu, P. (2010). Design the remote control system with the time-delay estimator and the adaptive smith predictor. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(1):73–80.
- [Lai et al., 2008] Lai, C., Hsu, P., e Wang, B. (2008). Design of the adaptive smith predictor for the time-varying network control system. *In Proceedings of the SICE Annual Conference*, pages 2933–2938.
- [Lasseter, 2002] Lasseter, R. (2002). Microgrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1(1):305–308.
- [Leite, 2005] Leite, V. J. S. (2005). *Estudos sobre estabilidade robusta de sistemas lineares por meio de funções dependentes de parâmetros*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP.
- [Leite e Miranda, 2008] Leite, V. J. S. e Miranda, M. F. (2008). Robust stabilization of discrete-time systems with time-varying delay: an LMI approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2008(1):1–15.
- [Leite et al., 2007] Leite, V. S., Peres, P. L. D., Castelan, E. B., e Tarbouriech, S. (2007). Estabilidade robusta de sistemas neutrais com atrasos variantes no tempo. *SBA Controle e Automação*, 18(4):434–446.

- [Leitão, 2010] Leitão, M. (2010). Implementação de um servidor OPC-UA em linguagem C# para comunicação com dispositivos através do protocolo modbus/ethernet em tempo real. Relatório técnico, Monografia do Curso de Engenharia de Computação, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- [Leland et al., 1994] Leland, W. E., Taqqu, M. S., W., W., e Wilson, D. V. (1994). On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2(1):1–15.
- [Löhning et al., 2008] Löhning, M., Ruder, J., e Bals, J. (2008). Robust stability analysis with integral quadratic constraints (IQCs): A design example. In *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Control Applications*, pages 816–821.
- [Li et al., 2009] Li, J., Zhang, Q., e Cai, M. (2009). Modeling and robust stability of networked control systems with packet reordering and long delay. *International Journal of Control*, 82(10):1773–1785.
- [Li et al., 2004] Li, S., Wang, Z., e Sun, Y. (2004). Observer-based compensator design for networked control systems with long time delays. In *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 678–683.
- [Lian et al., 2002] Lian, F., Moyne, J., e Tilbury, D. (2002). Network design consideration for distributed control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(2):297–307.
- [Liu et al., 2007] Liu, G. P., Xia, Y., Chen, J., Rees, D., e Hu, W. (2007). Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(3):1282 – 1297.
- [Liu e Fridman, 2009] Liu, K. e Fridman, E. (2009). Stability analysis of networked control systems: A discontinuous lyapunov functional approach. In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1330–1335.
- [Liu e Fridman, 2012] Liu, K. e Fridman, E. (2012). Networked-based stabilization via discontinuous lyapunov functionals. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 22(4):420–436.
- [Loan e Moler, 2003] Loan, C. V. e Moler, C. (2003). Nineteen dubious ways to compute the exponential of a matrix, twenty-five years later. *SIAM Review Society for Industrial and Applied Mathematics*, 45(1):3–49.
- [Louissel, 2001] Louissel, J. (2001). Delay differential systems with time-varying delay: new directions for stability theory. *Kybernetika*, 37(3):239–251.
- [Ma et al., 2007] Ma, C., Chen, S., e Liu, W. (2007). Maximum allowable delay bound of networked control systems with multi-step delay. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 15(5):513–520.

- [Mariam et al., 2013] Mariam, L., Basu, M., e Conlon, M. F. (2013). A review of existing microgrid architectures. *Journal of Engineering*, 2013(1):1–8.
- [Martins, 2001] Martins, E. (2001). Modelagem e controle de dosagens de produtos químicos em uma estação clássica de tratamento de água. Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFMG, Belo Horizonte, MG.
- [Martins e Jota, 2009] Martins, E. e Jota, F. G. (2009). Design of networked control systems with explicit compensation for time-delay variations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, 40(3):1–11.
- [Martins, 2009] Martins, E. C. (2009). *Projeto e implementação de sistemas de controle distribuído em redes de computadores*. Tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, Belo Horizonte, MG.
- [Megretski e Rantzer, 1997] Megretski, A. e Rantzer, A. (1997). System analysis via integral quadratic constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(6):819–830.
- [Metropolis e Ulam, 1949] Metropolis, N. e Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of The American Statistical Association*, 44(247):335–341.
- [Michiels et al., 2004] Michiels, W., Assche, V. V., e Niculescu, S. (2004). Time-delay systems with a controlled time-varying delay: stability analysis and applications. In *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, pages 4521–4526.
- [Miranda e Leite, 2008] Miranda, M. F. e Leite, V. J. S. (2008). Síntese convexa para sistemas incertos discretos no tempo com atrasos variantes. *SBA Controle e Automação*, 19(3):242–255.
- [Miranda e Leite, 2011] Miranda, M. F. e Leite, V. J. S. (2011). Robust stabilization of polytopic discrete-time systems with time-varying state delay: A convex approach. *Journal of the Franklin Institute*, 348(4):568–588.
- [Naghshtabrizi et al., 2007] Naghshtabrizi, P., Hespanha, J., e Teel, A. (2007). Stability of delay impulsive systems with application to networked control systems. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 4899–4904.
- [Naghshtabrizi et al., 2008] Naghshtabrizi, P., Hespanha, J. P., e Teel, A. R. (2008). Exponential stability of impulsive systems with application to uncertain sampled-data systems. *Systems and Control Letters*, 57(5):378–385.
- [Niculescu et al., 2003] Niculescu, S., Gu, K., e Abdallah, C. T. (2003). Some remarks on the delay stabilizing effect in SISO systems. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 2670–2675.
- [Nilson, 1998] Nilson, J. (1998). *Real time control systems with delays*. Tese de Doutorado, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

- [NTP, 2013] NTP (2013). <http://www.ntp.br/>. Site acessado em 27/05/2013.
- [Olaru e Niculescu, 2008] Olaru, S. e Niculescu, S. I. (2008). Predictive control for linear systems with delayed input subject to constraints. *In Proceedings of the 17th World Congress of The International Federation of Automatic Control - IFAC*, pages 11208–11213.
- [Oliveira et al., 2011] Oliveira, V., Trofino, A., e Hermes, C. J. L. (2011). A switching control strategy for vapor compression refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18):3914–3921.
- [OPC, 2013] OPC (2013). OPC unified architecture. <http://www.opcfoundation.org/>. Site acessado em 21/11/2013.
- [Paiva, 2013] Paiva, A. (2013). Controle de temperatura em câmaras de refrigeração. Relatório técnico, Monografia de Projeto Final de Curso de Engenharia de Controle e Automação, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- [Paladino e Ratto, 2000] Paladino, O. e Ratto, M. (2000). Robust stability and sensitivity of real controlled cstrs. *Chemical Engineering Science*, 55(2):321–330.
- [Papachristodoulou, 2004] Papachristodoulou, A. (2004). Analysis of nonlinear time-delay systems using the sum of squares decomposition. *In Proceedings of the American Control Conference*, pages 4153–4158.
- [Papachristodoulou et al., 2007] Papachristodoulou, A., Peet, M., e Niculescu, S. (2007). Stability analysis of linear systems with time-varying delays: delay uncertainty and quenching. *In Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2117–2122.
- [Park e Lee, 2001] Park, J. e Lee, J. (2001). Transmission modeling and simulation for internet-based control. *In Proceedings of the IEEE - IECON'01*, pages 165–169.
- [Patankar, 2003] Patankar, R. (2003). A model for fault-tolerant networked control system using TTP/C communication. *In Proceedings of the American Control Conference*, pages 533–537.
- [Peak, 2010] Peak (2010). *USB to CAN interface*. User Guide.
- [Peet et al., 2006] Peet, M., Papachristodoulou, A., e Lall, S. (2006). Positive forms and stability of linear time-delay systems. *In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 187–193.
- [Peng et al., 2009] Peng, C., Yue, D., Tian, E., e Gu, Z. (2009). A delay distribution based stability analysis and synthesis approach for networked control systems. *Journal of the Franklin Institute*, 346(4):349–365.

- [Peserchini e Jota, 2013] Peserchini, M. e Jota, F. G. (2013). Centralizes and distributed control architectures under foundation fieldbus network. *ISA Transactions*, 52(1):149–161.
- [Pin e Parisini, 2011] Pin, G. e Parisini, T. (2011). Networked predictive control of uncertain constrained nonlinear systems: Recursive feasibility and input-to-state stability analysis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(1):72–87.
- [Rahmani e Markazi, 2013] Rahmani, B. e Markazi, A. (2013). Variable selective control method for networked control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(3):975–982.
- [Rotkowitz et al., 2010] Rotkowitz, M., Cogill, R., e Lall, S. (2010). Convexity of optimal control over networks with delays and arbitrary topology. *International Journal of Systems, Control, and Communications*, 2(1-3):30–54.
- [Sahebsaraa et al., 2008] Sahebsaraa, M., Chen, T., e Shaha, S. (2008). Optimal H_∞ filtering in networked control systems with multiple packet dropout. *Systems and Control Letters*, 57(1):696–702.
- [Santos, 2004] Santos, M. (2004). *Metodologias de projeto para sistemas de controle via redes*. Tese de Doutorado, UFSC, Santa Catarina, SC.
- [Schendel, 2008] Schendel, J. (2008). Networked control systems simulation and analysis. Relatório técnico, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [Schurt et al., 2010] Schurt, L., Hermes, C., e Neto, A. T. (2010). Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*, 30(13):1538–1546.
- [Schurt et al., 2009] Schurt, L. C., Hermes, C. J. L., e Neto, A. T. (2009). A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 32(7):1672–1682.
- [Seborg et al., 1989] Seborg, D., Edgar, T., e Mellichamp, D. (1989). *Process dynamics and control*. John Wiley and Sons.
- [Sedgewick, 1978] Sedgewick, R. (1978). Implementing quicksort programs. *Communications of the ACM*, 21(10):847–857.
- [Seuret, 2009] Seuret, A. (2009). Stability analysis for sampled-data systems with a time-varying period. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pages 8130–8135.
- [Seuret, 2010] Seuret, A. (2010). Exponential stability and stabilization of sampled-data systems with time varying period. In *Proceedings of the 2010 World Congress of The International Federation of Automatic Control - IFAC*.

- [Seuret, 2011] Seuret, A. (2011). Stability analysis of networked control systems with asynchronous sampling and input delay. *In Proceedings of the American Control Conference*, pages 533–538.
- [Seuret e Johansson, 2012] Seuret, A. e Johansson, K. (2012). Networked control under time-synchronization errors. *Time Delay Systems: Methods, Applications and New Trends Springer*, 423(1):369–381.
- [Seuret e Silva Jr, 2011] Seuret, A. e Silva Jr, J. M. G. (2011). Networked control: Taking into account sample period variations and actuators saturation. *In Proceedings of the 2011 World Congress of The International Federation of Automatic Control - IFAC*, pages 1–6.
- [Shi et al., 2006] Shi, L., Epstein, M., e Murray, R. (2006). Networked control systems with norm bounded uncertainties: A stability analysis. *In Proceedings of the American Control Conference Minneapolis*, pages 2783–2788.
- [Shinskey, 1988] Shinskey, F. G. (1988). *Process control systems*. McGraw-Hill, New York, USA.
- [Silva e Lima, 2010] Silva, A. A. e Lima, M. (2010). Paradigmas da amostragem em sistemas de controle em rede. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, pages 550–557.
- [Silva, 2011] Silva, L. F. P. (2011). Estudo sobre inclusão de desempenho na síntese de controladores para sistemas discretos no tempo com atrasos nos estados. Dissertação de Mestrado, PPGEEL-CEFET-MG, Belo Horizonte, MG.
- [Silva, 2009] Silva, V. (2009). Projeto e implementação do controle automático de um sistema de refrigeração em ambiente distribuído. Relatório técnico, Monografia de Projeto Final de Curso de Engenharia de Controle e Automação, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- [Smith, 1957] Smith, O. J. M. (1957). Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, 53(5):217–219.
- [Spíndola, 2003] Spíndola, R. B. (2003). Controle automático para injeção otimizada de gás em poços de petróleo equipados para funcionamento com gás *lift* contínuo. Dissertação de Mestrado, UFRN, Rio Grande do Norte, RN.
- [Sun et al., 2010] Sun, X., Liu, G., Wang, W., e Rees, D. (2010). Stability analysis for networked control systems based on average dwell time method. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 20(1):1774–1784.
- [Sun et al., 2008] Sun, X., Zhao, J., e Wang, W. (2008). State feedback control for discrete delay systems with controller failures based on average dwell-time method. *IET Control Theory and Applications*, 2(2):126–132.

- [Takarabe et al., 2010] Takarabe, E., Oliveira, W. P., Grotkowski, M. A., e Maruyama, N. (2010). Sistemas de controle distribuídos em redes de comunicação. In *Proceedings of the IX INDUSCON - International Conference on Industry Applications*, pages 1–6.
- [Tejada et al., 2008] Tejada, A., Gonzalez, O., e Gray, W. (2008). Stability of digital control systems implemented in error-recoverable computers. *International Journal of Control*, 81(11):1665–1681.
- [Tempo e Ishii, 2007] Tempo, R. e Ishii, H. (2007). Monte carlo and las vegas randomized algorithms for systems and control an introduction. *European Journal of Control*, 13(2-3):189–203.
- [Tian, 2010] Tian, G. (2010). *Network protocols and predictive control strategies for distributed real-time control applications*. Tese de Doutorado, Queensland University of Technology.
- [Tian et al., 2012] Tian, G., Xia, F., e Tian, Y. (2012). Predictive compensation for variable network delays and packet losses in networked control systems. *Computers and Chemical Engineering*, 39(6):152–162.
- [Tian e Levy, 2008] Tian, Y. e Levy, D. (2008). Compensation for control packet dropout in networked control systems. *Information Sciences Elsevier*, pages 1263–1278.
- [Tipsuwan e Chow, 2003] Tipsuwan, Y. e Chow, M. (2003). Control methodologies in networked control systems. *Control Engineering Practice*, 11(10):1099–1111.
- [Tipsuwan e Chow, 2004] Tipsuwan, Y. e Chow, M. (2004). Gain scheduler middleware: A methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation - part I: networked control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(6):1218–1227.
- [Trnka et al., 2012] Trnka, P., Kodet, P., e Havlena, V. (2012). OPC-UA information model for large-scale process control applications. In *Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society - IECON*, pages 5793–5798.
- [Valmórbida et al., 2007] Valmórbida, G., Leite, V. J. S., e Peres, P. L. D. (2007). Condições LMI do teorema do ganho pequeno escalonado para análise de estabilidade de sistemas incertos com atraso. *SBA Controle e Automação*, 18(4):447–458.
- [Viana et al., 2010] Viana, D. C., Leite, V. J. S., e Miranda, M. F. (2010). Stability analysis and controller design for discrete-time fuzzy systems with time-varying delay. In *Proceedings of the 2010 World Congress of The International Federation of Automatic Control - IFAC*.

- [Walsh et al., 1999] Walsh, G. C., Ye, H., e Bushnell, L. (1999). Stability analysis of networked control systems. *In Proceedings of the American Control Conference*, pages 2876–2880.
- [Wang e Liu, 2008] Wang, F. e Liu, D. (2008). *Networked control systems: theory and applications*. Springer-Verlag London Limited, London.
- [Wang e Stengel, 2002] Wang, Q. e Stengel, R. F. (2002). Robust control of nonlinear systems with parametric uncertainty. *Automatica*, 38(1):1591–1599.
- [Wang et al., 2011] Wang, X., Fei, C., e Han, Z. (2011). Adaptive predictive functional control for networked control systems with random delays. *International Journal of Automation and Computing*, 8(1):62–68.
- [Wang e Lemmon, 2011] Wang, X. e Lemmon, M. (2011). Event-triggering in distributed networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(3):586–601.
- [Wang e Yang, 2010] Wang, Y. e Yang, G. (2010). Time delay and packet dropout compensation for networked control systems: a linear estimation method. *International Journal of Control*, 83(1):115–124.
- [Woei e Ray, 1990] Woei, L. e Ray, A. (1990). Integrated communication and control systems: Part III- nonidentical sensor and controller samplings. *Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, 112(3):357–364.
- [Wu et al., 2005] Wu, J., Deng, F., e Gao, J. (2005). Modeling and stability of long random delay networked control systems. *In Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pages 947–952.
- [Wu et al., 2011] Wu, L., Lam, J., Yao, X., e Xiong, J. (2011). Robust guaranteed cost control of discrete-time networked control systems. *Optimal Control Applications and Methods*, 32(1):95–112.
- [Xie, 2011] Xie, D. (2011). Fault tolerant control of networked control systems: time-delay switched system approach. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 1(3):375–387.
- [Xu e Hespanha, 2005] Xu, Y. e Hespanha, J. (2005). Estimation under uncontrolled and controlled communications in networked control system. *In Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 842–847.
- [Yan et al., 2007] Yan, H., Huang, X., Wang, M., e Zhang, H. (2007). Delay-dependent stability criteria for a class of networked control systems with multi-input and multi-output. *Chaos Solitons and Fractals*, 34(3):997–1005.
- [Yang et al., 2011] Yang, H., Xia, Y., e Shi, P. (2011). Stabilization of networked control systems with nonuniform random sampling periods. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 21(5):501–526.

- [Yang, 2006] Yang, T. (2006). Networked control system: a brief survey. *IEEE Control Theory Applications*, 153(4):403–412.
- [Yang e Li, 2009] Yang, F., W. W. e Li, Y. (2009). An iterative LMI approach to H_∞ networked control with random communication delays. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 1(3):325–341.
- [Yang e Wang, 2005] Yang, Y. e Wang, Y. (2005). Modeling and control for ncs with time-varying long delays. In *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pages 1407–1411.
- [Yang et al., 2004] Yang, Y., Xu, D., Tan, M., , e Dai, X. (2004). Stochastic stability analysis and control of networked control systems with randomly varying long time-delays. In *Proceedings of the World Congress Intelligent Control and Automation*, pages 1391–1395.
- [Yin et al., 2011] Yin, X., Cui, Q., Wen, Y., Xiao, Y., e Song, Y. (2011). Overview of networked control system based on hybrid control theory. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 3(4):377–389.
- [Yu et al., 2009] Yu, J., Wang, L., Zhang, G., e Yu, M. (2009). Output feedback stabilization of networked control systems via switched system approach. *International Journal of Control*, 82(9):1665–1677.
- [Yu, 2011] Yu, J.-J. (2011). Further results on delay-distribution-dependent robust stability criteria for delayed systems. *International Journal of Automation and Computing*, 8(1):23–28.
- [Yuan, 2008] Yuan, Y. (2008). Step-sizes for the gradient method. *International Press American Mathematical Society*, 2008(1):785–796.
- [Yue et al., 2005] Yue, D., Han, Q., e Lam, J. (2005). Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty. *Automatica*, 41(6):999–1007.
- [Yue et al., 2004] Yue, D., Han, Q., e Peng, C. (2004). State feedback controller design of networked control systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, 51(11):640–644.
- [Zeng et al., 2011] Zeng, H. B., He, Y., Wu, M., e Xiao, S. P. (2011). Absolute stability and stabilization for lurie networked control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 21(14):1667–1676.
- [Zhang, 2009] Zhang, J. (2009). A novel delay system approach to network-based control via stochastic distribution control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, pages 141–146.
- [Zhang e Wang, 2009] Zhang, J. e Wang, H. (2009). Stochastic distribution control strategy with application to networked control systems. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 14(2):158–165.

- [Zhang e Wang, 2010] Zhang, J. e Wang, H. (2010). Neuro-PID controller design for networked control systems with non-linearity and random delays using fisher information. *International Journal of Systems, Control and Communications*, 2(4):446–456.
- [Zhang, 2001] Zhang, W. (2001). *Stability analysis of networked control systems*. Tese de Doutorado, Case Western Reserve University, Cleveland, USA.
- [Zhang et al., 2001] Zhang, W., Branicky, M., e Phillips, S. (2001). Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(1):84–99.
- [Zhang e Yu, 2007] Zhang, W. e Yu, L. (2007). Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9):1705–1710.
- [Zhang e Yu, 2011] Zhang, W. e Yu, L. (2011). BIBO stability and stabilization of networked control systems with short time-varying delays. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 21(3):295–308.
- [Zhang et al., 2008] Zhang, X., Zheng, Y., e Lu, G. (2008). Stochastic stability of networked control systems with network-induced delay and data dropout. *Journal Control Theory Application*, 6(4):405–409.
- [Zhang et al., 2011] Zhang, Y., Cofie, P., Ajuzie, A., Zhang, J., e Akujuobi, C. M. (2011). Real-time random delay compensation with prediction-based digital redesign. *ISA Transactions*, 50(2):207–212.
- [Zhao et al., 2009] Zhao, Y., Liu, G., e Rees, D. (2009). Design of a packet-based control framework for networked control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(4):859–865.
- [Ziviani, 2006] Ziviani, N. (2006). *Projeto de algoritmos com implementação em Java e C++*. Thomson Learning.