

Euler Cunha Martins

*Projeto e Implementação de Sistemas de
Controle Distribuído em Redes de
Computadores*

Belo Horizonte - MG

Fevereiro de 2009

Euler Cunha Martins

*Projeto e Implementação de Sistemas de
Controle Distribuído em Redes de
Computadores*

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

Orientador:

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

Belo Horizonte - MG

Fevereiro de 2009

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Alpheu e Geralda,
ao Vô Geraldo, à Vó Maria e ao Tio Zé Geraldo.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Fábio Gonçalves Jota, pelo apoio, pelo entusiasmo, pela disponibilidade e pela constante ajuda, sempre mostrando o melhor caminho a seguir e, principalmente, por entender as dificuldades do trabalho e minhas limitações. Sou muito grato, também, à Professora Patrícia Romeiro da Silva Jota e ao Eng. Eduardo Carvalhaes Nobre pela excelente condução do Projeto CMUF, juntamente com o Professor Fábio Jota, o qual me permitiu a elaboração deste trabalho de doutorado.

Meus sinceros agradecimentos à toda equipe que trabalhou no Projeto CMUF: Prof. Ana Paula Batista e Prof. Maria Eugênia Freitas, e aos alunos da UFMG: Daniel Santos, Leandro Veiga, Thales Jacques, Breno Kastrup, Daniel Martins, Higor Fernandes, Hugo Montalvão, Douglas de Oliveira, Felipe Augusto, Caio Pimenta, Maíra Pôssas, Ranier Figueiredo e em especial ao Gustavo Oliveira, ao Rodrigo de Abreu, ao Rafael Pissolato e ao Tiago Amadeu pela ajuda extra.

Agradeço a todos amigos da UFMG que sempre sempre foram companheiros ao longo desta jornada: Professores Cássio Gonçalves do Rego, Fernando José da Silva Moreira, Luiz Themystokliz Sanctos Mendes, Carmela Maria Polito Braga, Ronaldo Tadêu Pena e Patrícia Nascimento Pena e às funcionárias da secretaria do PPGEE Anete e Arlete Vidal. Agradeço aos coordenadores do Curso de Eletrotécnica do CEFET-MG, professores Geraldo do Carmo e Maurílio Ferreira Leandro, pelo profissionalismo, generosidade e compreensão. Agradeço à Diretoria Geral do CEFET-MG, aos amigos professores e funcionários da Coordenação de Eletrotécnica do CEFET-MG, em especial, professores João Carlos, Eduardo Buccini, Pedro Bispo, Anderson Arthur, Anderson Vagner, Antônio Santana, Eduardo Bueno e Eduardo Gonzaga, pelo apoio e incentivo.

Pelo apoio financeiro, agradeço à CEMIG, FINEP e FUNDEP. Agradeço às empresas e pessoas participantes do projeto CMUF, pela colaboração e participação.

E, finalmente, agradeço à minha família, aos meus pais, meus irmãos Edgar e Evandro. Muito obrigado à Tia Perpétua e à Andréa pela grande ajuda, à Tereza Peixoto por todo apoio ao longo destes anos. Muito obrigado a todos amigos e mentores que me ajudaram a superar mais este desafio.

“As maiores oportunidades de aprendizagem surgem em nossa vida disfarçadas de desafios e dificuldades”

Lourdes Catherine (E. de Luz)

Resumo

Este trabalho apresenta as principais características dos sistemas de controle via redes e suas particularidades em relação aos sistemas clássicos de controle. Os efeitos dos atrasos de tempo provocados pelos enlaces de rede que interligam os elementos da malha de controle são analisados.

Foram realizados testes em uma planta real de primeira ordem (um circuito RC) e um estudo detalhado da influência individual e combinada dos atrasos introduzidos pela rede (sensor/controlador e controlador/atuador) é apresentado. Os testes foram realizados em uma “plataforma didática”, em que os enlaces de redes são substituídos por *buffers*, permitindo o total controle sobre estes eventos de tempo. Para análise do sistema em malha fechada foi utilizado um controlador PI projetado pelo método da Síntese Direta e implementado no formato de equações de diferenças, utilizando as transformações Z e δ .

É implementado um algoritmo preliminar de controle com compensação explícita do sinal de controle. Esse algoritmo utiliza um estimador para a saída da planta e um compensador para variações na ação de controle. A estratégia foi implementada em um sistema real visando a melhoria do desempenho do sistema em teste. Os resultados simulados e experimentais são apresentados.

Um algoritmo de controle, do qual a Internet faz parte, é apresentado. Esse algoritmo possui uma rotina de sincronização entre as máquinas local e remota, um estimador para a saída da planta baseado na transformada δ , um estimador on-line de parâmetros da planta, um controlador remoto, um controlador local e um sistema de chaveamento entre os controladores remoto e local. O algoritmo proposto é implementado em um sistema NCS real, desenvolvido neste trabalho, denominado NCS-CMUF. Inicialmente, o sistema é usado para o controle de um circuito RC (planta de primeira ordem) e, posteriormente, uma planta real: o Sistema de Tanques Interativos. Alguns resultados simulados e experimentais obtidos usando o algoritmo proposto, bem como a análise de estabilidade (em condições particulares), são apresentados.

Abstract

This work presents the main characteristics of the networked control systems and their particularities compared with the classical control systems. The effect of the delays, caused by the inherent network communication process between the various interconnected elements of the control loop, are analyzed.

Tests in a real plant, of first order (an RC circuit), have been carried out and a detailed study of the individual and the combined influence of the delays introduced by the network (sensor/controller and controller/actuator) are considered. The tests have been accomplished in “didactic platform”, where the network has been replaced by buffers to allow full control of the events in time. For analysis of the closed-loop, a PI-controller, designed by the well-known Direct Synthesis method, has been used and implemented in the form of differences equations, whose coefficients have been derived from the Z and δ transforms.

A preliminary control algorithm with explicit compensation of the control signal is implemented. This control algorithm uses an estimation of the plant output to compensate for variations in the control action. The strategy has been implemented in a real system aiming at improving the performance of the system under test. Simulated and experimental results are presented.

A control algorithm for NCSs, of which the Internet is part, is presented. This algorithm possesses a synchronization routine between the local and remote units, an estimator for the plant output based on δ transform, an on-line parameters estimator, a remote controller, a local controller and an automatic switching scheme between the remote and local controllers. The proposed algorithm is implemented in a real NCS system, developed for this work, named NCS-CMUF. Initially, the system is used to control an RC circuit (the first order plant) and, later, a real plant: the Interacting Tank System. Some simulated and experimental results obtained using the proposed algorithm, as well as an analysis of stability (under particular conditions), are presented.

Sumário

.....

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Nomenclatura	p. 19
Lista de Abreviaturas	p. 19
1 Introdução	p. 22
1.1 Motivação	p. 22
1.2 Objetivos	p. 23
1.3 O Problema de Sistemas de Controle via Redes	p. 24
1.3.1 Origem dos Atrasos	p. 24
1.3.2 Efeitos dos Atrasos na Malha Fechada	p. 27
1.4 Estrutura de um NCS	p. 29
1.5 Questões de Implementação de Sistemas de Controle via Redes	p. 30
1.5.1 Mensagens em NCS	p. 32
1.5.2 Escalonamento de Mensagens em Tempo-Real	p. 33
1.6 Estado da Arte em Sistemas de Controle via Redes	p. 36
1.7 Estrutura do Trabalho	p. 42

2	Descrição das Plantas e das Plataformas Utilizadas	p. 44
2.1	Introdução	p. 44
2.2	Plantas	p. 44
2.2.1	Planta 1	p. 44
2.2.2	Planta 2	p. 46
2.2.3	Sistema de Tanques Interativos - STI	p. 47
2.3	Plataformas	p. 49
2.3.1	Plataforma Didática para Estudos de NCS	p. 49
2.3.2	Plataforma NCS-CMUF	p. 52
2.4	Conclusão	p. 57
3	Projeto dos Controladores e Estimadores para NCSs	p. 58
3.1	Introdução	p. 58
3.2	Controladores PI	p. 58
3.2.1	Controlador PI em z para Controle da Planta 1	p. 59
3.2.2	Controlador PI em z para Controle da Planta 2	p. 60
3.2.3	Controlador PI em Delta para controle da Planta 1	p. 60
3.2.4	Controlador PI com Preditor de Smith para Controle da Planta STI	p. 62
3.3	Estimadores	p. 63
3.3.1	Estimador de Valores de Saída da Planta, em z	p. 63
3.3.2	Estimador de Valores de Saída da Planta, em Delta	p. 65
3.3.3	Estimador on-line dos Parâmetros da Planta	p. 70
3.4	Perda de Pacotes na Plataforma NCS-CMUF	p. 73
3.5	Conclusão	p. 76
4	Estratégias de Controle Propostas	p. 77
4.1	Introdução	p. 77

4.2	Sistema de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle para NCSs	p. 78
4.2.1	Estimador de valores de saída da planta	p. 79
4.2.2	Cálculo do sinal de controle	p. 80
4.2.3	Compensação do sinal de controle	p. 80
4.3	Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes	p. 85
4.3.1	Sincronização entre Controlador e Sensor/Atuador	p. 86
4.3.2	Estimação Online dos Parâmetros da Planta	p. 94
4.3.3	Estimação dos Valores de Saída da Planta	p. 95
4.3.4	Cálculo da Ação de Controle	p. 99
4.3.5	Chaveamento entre os Controladores Local e Remoto	p. 99
4.3.6	Perda de Pacotes	p. 106
4.4	Conclusão	p. 106
5	Resultados Emulados e Experimentais	p. 108
5.1	Introdução	p. 108
5.2	Comportamento dos Sistemas em função das Variações dos Atrasos nos NCS	p. 108
5.2.1	Efeitos isolados dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por tempo	p. 109
5.2.2	Efeitos dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por tempo	p. 111
5.2.3	Efeitos isolados dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por evento	p. 112
5.2.4	Efeitos dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por evento	p. 113
5.2.5	Efeitos isolados dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em Delta com disparo por evento	p. 114

5.2.6	Efeitos dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em Delta com disparo por evento	p. 115
5.3	Comportamento dos Sistemas em função das Variações dos Atrasos na Plataforma NCS-CMUF	p. 116
5.3.1	NCS Local - Controlador na Rede CAN	p. 116
5.3.2	NCS Remoto via Porta Serial - Controlador no <i>webserver</i>	p. 118
5.3.3	NCS Remoto via Internet - Controlador no PC ligado à Internet por TCP/IP	p. 120
5.4	Sistema de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle para NCSs	p. 128
5.4.1	Implementação do Sistema de Controle na Presença de Atrasos $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$	p. 129
5.4.2	Implementação do Sistema de Controle na Presença de Atrasos T_{SC} e T_{CA} Inferiores a $3Ta$	p. 129
5.4.3	Análise da Estabilidade	p. 130
5.5	Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes	p. 134
5.5.1	Implementação do Sistema de Controle	p. 134
5.5.2	Análise da Estabilidade	p. 143
5.6	Conclusão	p. 144
6	Conclusão	p. 145
6.1	Conclusão Geral	p. 145
6.2	Contribuições da Tese	p. 146
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	p. 148
	Referências	p. 150
	Apêndice A – Sequência de Mensagens no Controlador	p. 161
	Apêndice B – Programas em Pascal para os Algoritmos Utilizados na	

Estratégia de Controle Proposta	p. 168
B.1 Algoritmo de Sincronização	p. 168
B.2 Algoritmo de Estimação de Parâmetros online - MQR, com Fatoração U-D	p. 171
B.3 Algoritmo de Estimação, em Delta, para Valores de Saída da Planta 2 .	p. 174
B.4 Algoritmo de Atualização da Estimação, em Delta, para Valores de Saída da Planta 2	p. 176
B.5 Algoritmo para o Cálculo da Ação de Controle - Controlador PI em z para controle da Planta 2, com $h=125$ ms	p. 177
B.6 Algoritmo para o Cálculo da Ação de Controle - Controlador PI com Preditor de Smith para controle da Planta STI	p. 182
B.7 Módulo de Análise de Perda de Sinal de Controle	p. 187

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de latência na comunicação entre duas estações em uma rede .	p. 25
1.2	Exemplo da influência do atraso T_{SC} na disponibilização do valor medido para o controlador	p. 27
1.3	Exemplo da influência do atraso T_{CA} na disponibilização do valor calculado para o atuador	p. 28
1.4	Possíveis topologias de NCSs	p. 29
1.5	Arquitetura de rede de comunicação de dados baseado no modelo de 4 camadas	p. 34
1.6	Propriedades temporais de uma mensagem periódica de tempo-real . .	p. 35
2.1	Circuito RC que representa a Planta 1	p. 45
2.2	Diagrama de conexão da Planta 1 com a Plataforma Didática	p. 46
2.3	Circuito RC que representa a Planta 2	p. 46
2.4	Foto do sistema de tanques interativos	p. 47
2.5	Variação dos Parâmetros do Modelo de Primeira Ordem para o STI . .	p. 49
2.6	Malha de controle com adição de atrasos - Plataforma Didática	p. 50
2.7	Hardware da Plataforma Didática para estudos de NCS	p. 51
2.8	Exemplo de configuração para o sistema do CMUF	p. 53
2.9	Foto da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle local . .	p. 54
2.10	Esquema da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle local	p. 55
2.11	Foto da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle via Porta Serial	p. 55
2.12	Esquema da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle via Porta Serial	p. 56

2.13	Esquema da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle pela Internet	p. 56
3.1	Diagrama do Controlador PI com Preditor de Smith com ação “anti-windup” (SHINSKEY, 1988)	p. 62
3.2	Exemplo 1: variação do atraso T_{CA} e de sua média móvel	p. 67
3.3	Exemplo 2: variação do atraso T_{CA} e de sua média móvel	p. 67
3.4	Correlação temporal entre os sinais $u(k)$ e $y(k)$ em um NCS	p. 69
3.5	Intervalo considerado para execução do algoritmo de mínimos quadrados	p. 72
3.6	Exemplo de sequência de sinais na planta - cálculo da ação de controle média	p. 73
3.7	Exemplo de uma situação de perda de sinal de controle	p. 75
4.1	Diagrama esquemático da estratégia de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle para NCSs	p. 78
4.2	Exemplo da representação dos atrasos	p. 79
4.3	Efeito do esquema de compensação do sinal de controle	p. 82
4.4	Diagrama funcional do Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes	p. 86
4.5	Sequência de mensagens para sincronização entre dois nós	p. 88
4.6	Sequência de recepção de solicitação e resposta pelo nó remoto	p. 89
4.7	Tela de comando e supervisão NCS-CMUF	p. 90
4.8	Exemplo de um perfil de comportamento dos atrasos globais no NCS-CMUF	p. 91
4.9	Sincronização entre os eventos de amostragem e controle no NCS-CMUF	p. 91
4.10	Atraso de tempo no acionamento do sensor no NCS-CMUF	p. 93
4.11	Sequência de mensagens iniciais na rede CAN do NCS-CMUF	p. 93
4.12	Valores estimados pelo MQR para os parâmetros $\theta_1 = \alpha$ e $\theta_2 = \beta$ na planta 2	p. 96
4.13	Perfil do atraso T_{CA} durante a estimação dos parâmetros θ_1 e θ_2 na Planta 2	p. 96

4.14	Comparação entre os valores estimados em z e medidos para o NCS-CMUF	p. 98
4.15	Comparação entre os valores estimados em δ e medidos para o NCS-CMUF	p. 98
4.16	Sequência de mensagens na rede CAN no NCS-CMUF em malha fechada	p. 101
4.17	Esquema para chaveamento de controladores com chaveamento nos sinais de erro e de controle	p. 102
4.18	Esquema para chaveamento de controladores com chaveamento nos sinais de erro e de controle em um NCS	p. 103
4.19	Sequência de mensagens na rede CAN na plataforma NCS-CMUF em uma situação de perda de link de Internet	p. 104
4.20	Resposta da planta 2 na plataforma NCS-CMUF utilizando a técnica de chaveamento automático do controlador remoto para o local	p. 105
4.21	Tela de comando e supervisão da plataforma NCS-CMUF modificada para acionamento dos controladores	p. 105
5.1	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} , controlador em z disparado por tempo	p. 109
5.2	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{CA} , controlador em z disparado por tempo	p. 110
5.3	Exemplos de sequências de atrasos inferiores a um período de amostragem, que foram aplicados ao NCS	p. 110
5.4	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} e T_{CA} , com controlador em z disparado por tempo	p. 111
5.5	Exemplos de sequências de atrasos inferiores a três períodos de amostragem, que foram aplicados ao NCS	p. 112
5.6	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} , controlador z disparado por evento em	p. 112
5.7	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{CA} , controlador disparado por evento em z	p. 113
5.8	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} e T_{CA} , com controlador disparado por evento em z	p. 114

5.9	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} , controlador disparado por evento em delta	p. 115
5.10	Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} e T_{CA} , com controlador em Delta disparado por evento	p. 116
5.11	Sequência de mensagens na rede CAN referente a um ciclo de controle na plataforma NCS-CMUF, com controle local	p. 117
5.12	Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle local	p. 118
5.13	Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle local	p. 118
5.14	Sequência de mensagens nas redes CAN e RS-232 referentes a um ciclo de controle	p. 119
5.15	Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle via porta serial	p. 120
5.16	Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle via porta serial	p. 121
5.17	Sequência de mensagens nas redes CAN, RS-232 e Internet, referentes a um ciclo de controle	p. 122
5.18	Valores dos atrasos globais na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (LCPI)	p. 123
5.19	Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (LCPI)	p. 123
5.20	Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (LCPI)	p. 124
5.21	Valores dos atrasos globais na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Wireless CPDEE)	p. 125
5.22	Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Wireless CPDEE)	p. 125
5.23	Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Wireless CPDEE)	p. 126

5.24	Valores dos atrasos globais na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Linha Discada)	p. 127
5.25	Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Linha Discada)	p. 128
5.26	Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Linha Discada)	p. 128
5.27	Valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} para $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$	p. 129
5.28	Resposta em MF para atrasos $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$	p. 130
5.29	Valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} para $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$	p. 130
5.30	Resposta em MF para atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem	p. 131
5.31	Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF, com controlador PI sem estimação	p. 135
5.32	Ação de controle aplicada ao STI - Controlador PI sem estimação . . .	p. 135
5.33	Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF, com controlador PI com estimador em z	p. 136
5.34	Ação de controle aplicada ao STI - Controlador PI com estimador em z	p. 136
5.35	Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF, com controlador PI sem estimação disparado por evento	p. 137
5.36	Ação de controle aplicada ao STI - Controlador PI disparado por evento	p. 137
5.37	Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF - Controlador preditivo e adaptativo via redes	p. 138
5.38	Ação de controle aplicada ao STI - Controlador preditivo e adaptativo via redes	p. 138
5.39	Variação do atraso T_{CA} na plataforma NCS-CMUF	p. 139
5.40	Parcelas m_{TCA} e n_{TCA} no atraso T_{CA} médio da Figura 5.39	p. 140
5.41	Parâmetros θ_1 e θ_2 estimados para o STI	p. 140
5.42	Ganho e constante de tempo estimados para o STI	p. 141
5.43	Sinais de controle aplicados ao STI	p. 142

5.44 Comportamento da vazão de saída do TQ02 no teste	p.142
---	-------

Lista de Tabelas

1.1	Parâmetros de mensagens de comunicação em tempo-real	p.35
3.1	Lista de Valores utilizados na Sintonia do Controlador PI+PS no STI	p. 63
4.1	Lista de Mensagens na rede CAN mostradas na Figura 4.16	p.100

Nomenclatura

ACC_{ud}	Déficit do sinal de controle acumulado
Ack	Mensagem de confirmação (<i>Acknowledgment</i>)
ARPANET	Rede da Agência de Pesquisa e Projetos Avançados
a_n	Coefficientes do polinômio $A(z^{-1})y(k)$ no modelo ARMAX
b_n	Coefficientes do polinômio $B(z^{-1})u(k-1)$ no modelo ARMAX
CAN	Controller Area Network
CLP	Controlador Lógico Programável
CMUF	Centro de Monitoramento de Usos Finais
CSMA/CD	Múltiplo Acesso com Verificação de Presença de Portadora e Detecção de Colisão
DARPA	Agência de Projetos de Pesquisas Avançados em Defesa
DCS	Sistema de Controle Distribuído
$e(k)$	Sinal de erro do controlador
h	Período de Amostragem
h_L	Período de Amostragem do Relógio Local
h_R	Período de Amostragem do Relógio Remoto
ISA	Sociedade Americana de Instrumentação
K	Ganho da planta
K_c	Ganho do controlador
k_f	Ganho do filtro do ACC_{ud}
k	Número (índice) da amostragem
$\mathbf{K}(k)$	Matriz do filtro de Kalman
LAN	Rede de Área Local
LLC	Controle do Enlace Lógico
LQG	Linear Quadrático Gaussiano
LTI	Linear e Invariante no Tempo
MAC	Controle de Acesso ao Meio

MAP/EPA	Protocolo de Automação da Manufatura/ Arquitetura de Desempenho Aprimorado
MAP/TOP	Protocolo de Automação da Manufatura/ Protocolo Técnico e de Escritório
MF	Malha Fechada
MQR	Mínimo Quadrado Recursivo
MSP	Preditor de Smith Modificado
m_{TCA}	Número inteiro de períodos de amostragem em T_{CA}
m_{TSC}	Número inteiro de períodos de amostragem em T_{SC}
NCS	Sistema de Controle via Redes
NCS-CMUF	Sistema de Controle via Redes do Centro de Monitoramento de Usos Finais
nm	Número de medidas em um intervalo de amostragem
n_{TCA}	Número fracionário de períodos de amostragem em T_{CA}
n_{TSC}	Número fracionário de períodos de amostragem em T_{SC}
PI	Proporcional e Integral
PI+PS	Proporcional e Integral com Preditor de Smith
PS	Preditor de Smith
$\mathbf{P}(k)$	Matriz de covariância no algoritmo MQR
QoS	Qualidade do serviço
RC	Resistivo e capacitivo
SCADA	Supervisão Controle e Aquisição de Dados
STI	Sistema de Tanques Interativos
TCP/IP	Protocolo de Controle de Transmissão/ Protocolo Internet
T_{AD}	Atraso do sensor
T_{AQ}	Atraso de aquisição
T_{CA}	Atraso na comunicação entre controlador e atuador
T_{DA}	Atraso do atuador
T_P	Atraso computacional
T_{SC}	Atraso na comunicação entre sensor e controlador
T_{GL}	Atraso de tempo global em um período de amostragem
T_i	Tempo Integral do controlador PI
ud	Déficit do sinal de controle
USP	Preditor de Smith Unificado
$u(t)$	Sinal de controle contínuo no tempo

u_k	Sinal de controle discreto no tempo
\hat{u}_k	Sinal de controle estimado na amostragem k
\hat{u}_{c_k}	Sinal de controle corrigido na amostragem k
\bar{u}_k	Sinal de controle equivalente na amostragem k
WAN	Rede de Área Global
WCET	Tempo de Execução no Pior Caso
WCRT	Tempo de Resposta no Pior Caso
$y(t)$	Valor de saída da planta contínuo no tempo
y_k	Valor de saída da planta discreto no tempo
\hat{y}_k	Valor estimado para a saída da planta na amostragem k
\bar{y}_k	Valor medido para a saída da planta na amostragem k
ZOH	Extrapolador de ordem zero
α_n	Coefficientes do polinômio $y(k)$ no modelo LTI
α_c	Coefficientes do polinômio $e(k)$ no controlador
β_n	Coefficientes do polinômio $u(k)$ no modelo LTI
β_c	Coefficientes do polinômio $u(k)$ no controlador
χ	Compensação de relógio para sincronização
Δ	Intervalo de tempo entre a aplicação de 2 sinais de controle
δ	Operador delta
γ	Constante de tempo do filtro do ACC_{ud}
λ	Fator de esquecimento
ψ	Fator de suavização exponencial da média móvel
ρ	Operador diferencial
τ	Constante de Tempo da planta
τ_c	Constante de Tempo do controlador
θ_p	Tempo Morto da planta
$\theta(k)$	Matriz de parâmetros estimados pelo algoritmo MQR
θ_n	Parâmetros estimados pelo algoritmo MQR
$\varphi(k)$	Matriz de regressores no algoritmo MQR
ξ	Sinal de ruído

1 *Introdução*

Um sistema de controle consiste essencialmente de três partes principais: um elemento sensor para medição da saída do processo, um controlador e um elemento atuador para a implementação do sinal de controle à planta física. Em um sistema de controle tradicional, os dispositivos de campo (sensor e atuador) são, em geral, diretamente conectados ao controlador por meio de sinais elétricos analógicos (de tensão ou de corrente), de forma que os sinais elétricos que representam os valores das variáveis estão sempre disponíveis. Uma outra forma de interligação dos componentes em uma malha de controle utiliza sinais elétricos digitais em substituição aos sinais analógicos, conferindo menor susceptibilidade a interferências externas, de forma que atualmente há uma tendência pela escolha dos sistemas de controle digitais (ALBERT, 2004).

Visando diminuir os custos com cabeamento e manutenção e ainda aproveitar os benefícios dos sistemas distribuídos, proporcionados por uma estrutura de rede de comunicação de dados, os sistemas de controle estão utilizando as redes de comunicação para interligação dos elementos de campo, são os chamados Sistema de Controle via Redes ou *Networked Control Systems (NCS)*. Os sistemas de controle via redes apresentam grandes possibilidades e vantagens em relação aos sistemas de controle digitais convencionais; por outro lado, a presença de atrasos provocados pela rede de comunicação altera o comportamento da planta em malha fechada.

1.1 **Motivação**

A rápida expansão da tecnologia digital, que oferece componentes de informática e eletrônica a custos cada vez menores e o desenvolvimento de sensores e atuadores agregados a dispositivos de comunicação inteligentes para o ambiente de redes de comunicação de campo (*fieldbuses*), faz com que a implementação de sistemas de controle via redes se torne cada vez mais viável técnica e financeiramente.

A integração dos elementos de uma malha de controle (sensores, controladores e atuadores), incorporados com recursos de comunicação, às redes de uso geral, pode fazer com que, em um futuro próximo, os NCSs passem a ser o padrão em termos de controle digital (HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU, 2007).

Os NCSs são sistemas de controle distribuído caracterizados pela presença de dispositivos que podem desempenhar várias funções e possuem a capacidade de compartilhar informações numa rede de comunicação de dados. Sistemas de controle distribuído possibilitam aplicações em que a interação entre unidades de uma malha de controle ocorra de forma independente da localização relativa destas (COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 1996). As principais aplicações incluem, por exemplo, automação industrial, instrumentação distribuída, veículos autônomos, robôs domésticos, ambientes virtuais distribuídos, distribuição de energia e edifícios inteligentes (LIBERATONE, 2006).

A mudança da arquitetura de comunicação de uma conexão ponto-a-ponto para uma rede de comunicação de dados pode trazer enormes vantagens, tais como aumento da confiabilidade e possibilidade de reconfiguração remota dos módulos, custo de manutenção inferior e flexibilidade na arquitetura de controle. Porém, a introdução de um enlace de rede introduz diferentes formas de atraso de tempo e incertezas na dinâmica do sistema em malha fechada. Além disso, o atraso de tempo em uma aplicação de controle possivelmente irá degradar o desempenho do sistema de controle e até mesmo resultar em instabilidade para o sistema. Faz-se necessário a correta escolha da rede de comunicação e da técnica de controle empregada e os respectivos ajustes ou sintonias, a fim de garantir a estabilidade e o desempenho do NCS.

1.2 **Objetivos**

Este trabalho tem por objetivos apresentar um estudo sobre os impactos dos atrasos de comunicação e processamento em uma malha de controle do tipo NCS e propor algoritmos de controle que possam lidar com esses atrasos, que são variáveis, de forma a tornar a malha menos susceptível a essas variações.

Para as etapas de testes preliminares e desenvolvimento das propostas de controle, circuitos RC são utilizados para emular o comportamento dinâmico de uma variável sob condições controladas. Posteriormente é utilizada como planta um Sistema de Tanques Interativos (STI), desenvolvido e montado no Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) da UFMG.

O enfoque principal deste trabalho, no que diz respeito à proposição de técnicas de controle, é o desenvolvimento de sistemas de controle que possam utilizar a Internet como parte do elo de realimentação entre a planta (juntamente com as unidades sensora e atuadora) e o controlador. Entende-se que a possibilidade de se implementar o controlador independentemente da localização da planta é uma alternativa extremamente interessante. Esta configuração abre uma série de possibilidades de aplicação, tais como: laboratórios virtuais de controle e centros de excelência em controle, além de apresentar um maior desafio, do ponto de vista de controle, em função da maior amplitude e variância dos atrasos na rede.

1.3 O Problema de Sistemas de Controle via Redes

A introdução de uma rede de comunicação de dados em uma malha de controle gera o problema da adição de atrasos na transferência dos dados entre os elementos de campo. Estes atrasos podem variar aleatoriamente, tornando a planta variante no tempo e impedindo a regularidade entre os períodos de amostragens nas unidades de campo (NILSSON, 1998) (ALBERT, 2004).

1.3.1 Origem dos Atrasos

A latência, em rede de comunicação, corresponde à diferença de tempo entre o envio de um pacote de dados de um ponto e a sua chegada a outro. Considerando a troca de mensagens entre duas estações, denominadas “estação 1” e “estação 2”, interligadas por uma rede de comunicação de dados, a Figura 1.1 mostra um exemplo de latência associada à transmissão de uma informação entre estas duas estações. Nessa figura, o ciclo de comunicação ocorre de forma sequencial a partir do instante da requisição de mensagem na estação 1 (instante t_0).

- t_0 : instante de requisição da estação 1 para a estação 2;
- $T_1 = t_1 - t_0$: tempo para processamento do pedido de transmissão a ser feita pela estação 1 para a estação 2;
- $T_2 = t_2 - t_1$: tempo para a estação 2 receber a solicitação da estação 1;
- $T_3 = t_3 - t_2$: tempo para processamento da mensagem recebida pela estação 2;
- $T_4 = t_4 - t_3$: tempo para montagem da resposta na estação 2;

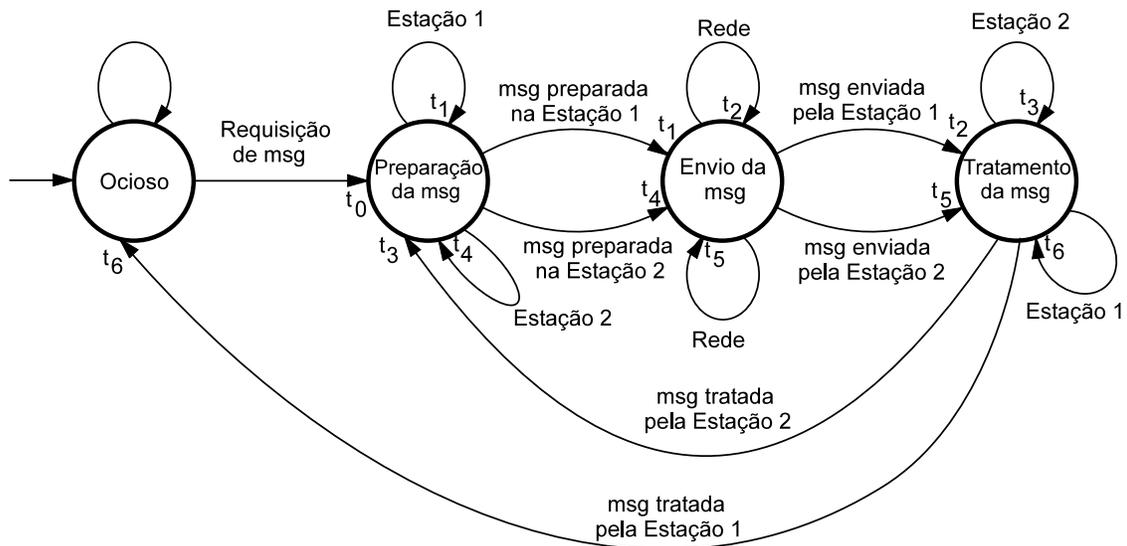


Figura 1.1: Exemplo de latência na comunicação entre duas estações em uma rede

- $T_5 = t_5 - t_4$: tempo para a estação 1 receber a resposta da estação 2;
- $T_6 = t_6 - t_5$: tempo para processamento da resposta na estação 1;

Em NCSs, a latência total é dada pela soma dos atrasos associados à rede de comunicação, com os atrasos associados às unidades da malha de controle (sensores, controladores e atuadores). Os atrasos presentes em Sistemas de Controle por Redes são classificados como:

a) Aquisição T_{AQ}

É o atraso associado ao evento de solicitação da aquisição de uma nova medida da saída do processo. Considerando que a solicitação desta transmissão é realizada através do barramento de comunicação, existe um atraso que é função das características deste meio.

b) Sensor T_{AD}

O atraso do sensor é composto pelo tempo gasto na conversão A/D e pelos eventuais tempos utilizados no processamento do sinal, tais como filtros.

c) Entre o Sensor e o Controlador T_{SC}

É definido como o atraso entre a disponibilização do valor medido pelo sensor e a recepção deste valor pelo controlador.

d) Entre o Controlador e o Atuador T_{CA}

É definido como o atraso entre a disponibilização do valor da ação de controle pelo controlador e a recepção deste valor pelo atuador.

Tanto o atraso T_{SC} quanto o atraso T_{CA} dependem fortemente do tipo de barramento utilizado. Os atrasos de comunicação são as maiores fontes de latência na malha de controle de um NCS.

e) Computacional T_P

O atraso computacional é o tempo gasto para o processamento do sinal de controle pelo controlador. Em geral, a operação do sistema e a sua política de escalonamento são os fatores que mais influenciam o valor de T_P .

f) Atuador T_{DA}

Por fim existe um atraso entre a recepção do sinal de controle e a efetiva transferência do atuador para a planta.

Quando os atrasos totais, associados a uma tarefa de medição, apresentam valores que podem superar um período de amostragem, outros dois eventos surgem no NCS:

1- 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.

2- Amostragem Vazia

O fenômeno da amostragem vazia é caracterizado pela ausência da grandeza medida dentro de um intervalo de amostragem.

Os atrasos em NCSs dependem basicamente do fluxo de mensagens e do tipo de rede usada. São fatores determinantes da amplitude e previsibilidade dos atrasos em um sistema de controle via redes: o protocolo utilizado pela rede, a forma de acesso ao meio, as regras de transmissão, as formas de tratamento de colisão e retransmissão e taxa de transmissão. Em relação ao tipo de acesso ao meio em uma rede de comunicação, as redes utilizadas em NCSs são divididas em:

a) Redes de Serviço Cíclico

Em redes locais que utilizam protocolos de serviço cíclico tais como IEEE 802.4, SAE Token Bus, PROFIBUS, IEEE 802.5, SAE Token Ring, MILSTD-1553B e FIP,

os sinais medidos e calculados são transmitidos em ordem cíclica com comportamento determinístico. Por essa razão os atrasos são fixos, ou seja, $T_{SC}(k+1) = T_{SC}(k)$ e $T_{CA}(k+1) = T_{CA}(k)$ (RAY; HALEVI, 1988). Os modelos funcionam perfeitamente na teoria, na prática pequenas variações nos atrasos são observados em função, por exemplo, das diferenças nos relógios das unidades (TIPSUWAN; CHOW, 2003).

b) Redes de Acesso Aleatório

Redes locais de acesso aleatório tais como CAN e Ethernet contam com atrasos incertos. Uma parte significativa do atraso aleatório nessas redes é devida às filas de espera e às colisões entre mensagens. Outros fatores influenciam nos valores dos atrasos nessas redes, tais como as filas de espera em *switchs* e roteadores, propagação de atrasos nos vários caminhos da rede e conexão com redes de serviço cíclico (RAY; HALEVI, 1988).

1.3.2 Efeitos dos Atrasos na Malha Fechada

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. É mostrado na Figura 1.2 uma ilustração da influência do atraso T_{SC} no instante de disponibilização do valor medido para o controlador.

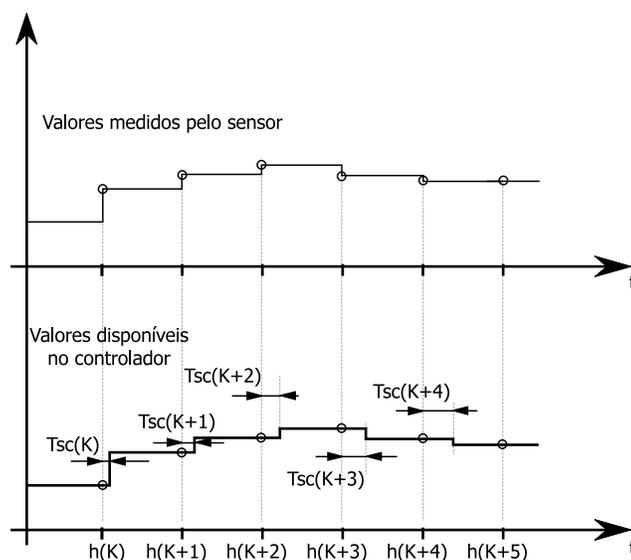


Figura 1.2: Exemplo da influência do atraso T_{SC} na disponibilização do valor medido para o controlador

A presença dos atrasos T_{CA} provoca irregularidade no período de amostragem na atuação. A Figura 1.3 apresenta a alteração provocada nos instantes de recepção do sinal de controle em função do atraso T_{CA} .

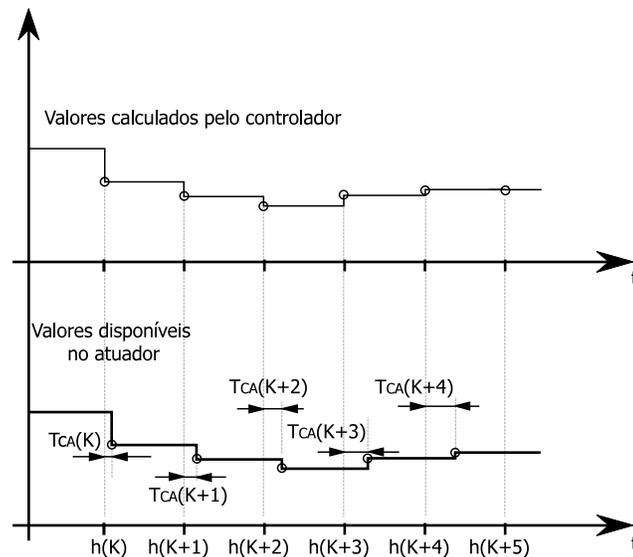


Figura 1.3: Exemplo da influência do atraso T_{CA} na disponibilização do valor calculado para o atuador

Estes atrasos fazem com que algumas regras do controle digital clássico deixem de ser satisfeitas, dentre elas a sincronização e regularidade temporal entre as tarefas de amostrar, calcular e atuar. Desta forma, observa-se perda de qualidade da resposta em sistemas de controle do tipo NCS nos casos em que os efeitos dos atrasos são desconsideradas. Os principais efeitos decorrentes da presença de atrasos em NCSs são:

1- Degradação do Desempenho

Da mesma forma que os atrasos puro de tempo influenciam uma malha de controle clássica, os atrasos provocados pela rede afetam um sistema de controle via redes, degradando seu desempenho devido à perda de regularidade nas amostragens para a disponibilização dos valores medidos ao controlador e disponibilização dos sinais de controle ao atuador.

No capítulo 5 deste texto serão apresentados os resultados de vários testes que também mostrarão como os atrasos provocados pela rede degradam o desempenho dos Sistemas de Controle via Redes.

2- Desestabilização

Os atrasos em uma malha de controle, incluindo os atrasos provocados pela rede em um NCS, podem levar o sistema à instabilidade em função da redução sistemática da margem de estabilidade. Vários estudos apresentam critérios de análise de estabilidade para NCS, a fim de garantir que estes permaneçam em regiões de estabilidade para certas

condições operacionais. Contudo, não existe um critério de análise de estabilidade que possa ser aplicado a todos os NCSs. Muitos dos critérios apresentados se aplicam a condições específicas de rede, protocolos e técnicas de controle.

Para atrasos constantes e conhecidos, critérios simplificados de análise de estabilidade para sistemas discretos, tais como o apresentado em (ASTROM; WITTENMARK, 1997), podem ser aplicados em NCSs.

NCSs com atrasos periódicos podem ser avaliados com a utilização de técnicas de análises clássicas, por exemplo, localização de autovalores no círculo unitário para uma determinada configuração (HALEVI; RAY, 1988) e análise no domínio da frequência (HONG, 1995), que é um critério limitado a sistemas unidimensionais.

1.4 Estrutura de um NCS

Em um NCS, os elementos sensor, controlador e atuador podem ser considerados sistemas computacionais com uma interface de comunicação sob a rede (nós de comunicação). A disposição dos nós na rede de um sistema de controle pode ser basicamente realizada de três formas distintas, caracterizando assim três possíveis topologias de NCSs, conforme mostrado na Figura 1.4 (SANTOS, 2004b).

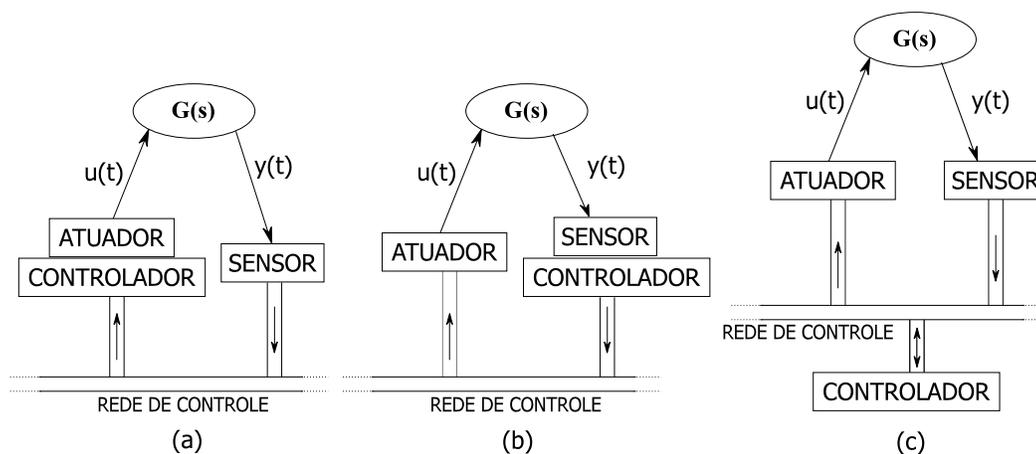


Figura 1.4: Possíveis topologias de NCSs

Dos atrasos descritos anteriormente, dois tipos merecem atenção especial: os atrasos relacionados com a execução das tarefas nos nós de processamento e os atrasos relacionados com a transmissão de mensagens sob a rede de comunicação (YANG; LI; YANG, 2005) (RAY, 1989). Na Figura 1.4, a diferença entre as topologias está na quantidade de mensagens na rede de comunicação, nos atrasos envolvidos e nas variações de atrasos na execução de

tarefas e transmissão de mensagens. Todos estes aspectos podem influenciar diretamente no desempenho e na estabilidade do sistema de controle via rede. Nas Figuras 1.4(a) e 1.4(b), o sistema de controle é composto de dois nós diferenciando-se entre si pela disposição do controlador. Os dois nós geram apenas um fluxo de mensagem sob a rede de comunicação. Já na Figura 1.4(c), o NCS compõe-se de três nós que geram dois fluxos de mensagens na rede de comunicação (SANTOS, 2004b). A estrutura NCS com dois enlaces de rede (Figura 1.4(c)) será utilizada neste trabalho de doutorado.

Tendo em vista que os atrasos na rede de comunicação podem variar aleatoriamente e depender do tráfego da rede no instante da transmissão, é difícil obter uma representação desses atrasos por meio de um simples modelo que possa ser usado como referência para o projeto do controlador. A ocorrência de perda de pacotes e amostragem vazia, por exemplo, são fenômenos que dificultam ainda mais essa representação (LOONTANG; SILVA, 2006).

1.5 Questões de Implementação de Sistemas de Controle via Redes

Sistemas de controle distribuído são sistemas nos quais o controle de processos é realizado por estações de uma rede localizadas próximo às unidades a serem monitoradas ou controladas. Estas estações realizam tarefas específicas e cooperativas e são interligadas por um sistema de comunicação para o envio de variáveis de controle, reconfiguração de parâmetros e estrutura de controle, e para supervisão do processo. A divisão de processamento por unidades independentes de controle confere uma maior confiabilidade ao sistema, uma vez que falhas em uma unidade da rede irá afetar uma pequena parte do processo, permitindo o funcionamento do restante do sistema ou mesmo a transferência das tarefas perdidas para outro elemento da rede (COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 1996).

Em uma malha de controle tipo NCS, a rede comporta-se como o elo de ligação entre os elementos sensores, controladores e atuadores, sendo que estes podem localizar-se em pontos distintos da rede ou possuir funções conjuntas no mesmo ponto de rede. A transferência de valores relativos às variáveis de processo (Variável de Processo, *Setpoint* e Sinal de Controle) é realizada por meio de trocas de mensagens pela rede.

Os NCS formam a infra-estrutura para os Sistemas de Controle Distribuído, que são caracterizados pela presença de dispositivos que contém várias funções e capacidade de

compartilhar informações nesta rede, o *fieldbus*. Em função disto, os sistemas de controle tornam-se cada vez mais complexos e sofisticados, e conseqüentemente, torna a etapa de projeto mais difícil e altamente dependente da aplicação (CAUFFRIEZ et al., 2004).

Em relação aos sistemas tradicionais de controle, os NCS apresentam as seguintes particularidades:

- o projeto do sistema de controle precisa considerar que a rede de comunicação em tempo real oferece atrasos de comunicação, que podem ser variáveis.
- o projeto do sistema de controle precisa considerar o escalonamento de tarefas no controlador que resulta em um algoritmo de controle que necessita de tempos variáveis na CPU.
- o projeto da rede de comunicação deve considerar eventuais atrasos na troca de mensagens entre os elementos participantes da rede.

Em algumas aplicações, principalmente industriais, o requisito *tempo* é fundamental para garantia da confiabilidade, exatidão e estabilidade dos processos, nestes contextos, o conhecimento e a garantia sobre o tempo de troca de mensagens dentro da rede torna-se fundamental. Uma rede em tempo-real, além de disponibilizar as tarefas básicas de uma rede de comunicação, garante intervalos de tempo conhecidos entre as trocas de mensagens, o que permite prever e contabilizar estes intervalos no algoritmo de controle.

As redes de comunicação em tempo-real são implementadas a partir do modelo *RM-OSI* (ISO THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1985). Nessas aplicações, são utilizadas apenas as camadas 1, 2 e 7 do modelo original. A eliminação de camadas não fundamentais é desejável para promover a satisfação de restrições tempo-real (conceito de tempo de travessia de camadas). As camadas Rede e Transporte foram suprimidas assumindo-se que não haveria problema (nem sequer necessidade) de controlar a passagem de tramas por nós ou estações intermédias. Como os dados nestas aplicações são curtos, não há necessidade de empacotamento. O mesmo motivo faz com que a camada Sessão não seja necessária. Esta arquitetura simplificada pode garantir a transmissão de mensagens em tempo-real por meio de mecanismos de escalonamento de mensagens e acesso determinístico ao meio por parte das camadas MAC e LLC.

Quando uma rede de comunicação é implementada com a finalidade de interligar elementos associados à tarefas de automação e/ou controle de processos, as necessidades e as características destas aplicações fazem com que as redes tradicionais, utilizadas em

LANs e WANs, não consigam atender de forma plena. Em um ambiente industrial, por exemplo, a rede de comunicação apresenta características bem específicas, tais como:

- Ser instalada em ambiente agressivo, muitas vezes com presença de agentes químicos, interferência eletromagnética, etc.
- Apresentar relação crítica em relação aos tempos de atraso associados à troca de informações.
- Tratar-se normalmente de uma rede de equipamentos, sem a presença de operadores humanos para acompanhamento e manutenção.
- Apresentar alta densidade de elementos onde o fator custo é primordial.

1.5.1 Mensagens em NCS

Ao transmitir informações utilizando como meio uma rede de comunicação, atrasos são adicionados de forma que o tempo total de processamento seja maior do que em uma estrutura convencional. Os atrasos de comunicação incluem os atrasos de acesso ao meio de comunicação (escalonamento de mensagens) e da transmissão de mensagens. O atraso de transmissão de mensagem é aproximadamente constante, já o atraso de acesso ao meio é variável e depende da carga na fila de transmissão sob a rede e também do protocolo de acesso ao meio utilizado.

A rede de comunicação é um recurso compartilhado pelos nós de processamento, quanto maior o número de nós que se utilizam deste meio, maior será o fluxo de mensagens sob a rede e, conseqüentemente, maiores serão os atrasos desta operação. Pode-se determinar o tempo de transmissão no pior caso para mensagens (WCRT), em função do número de nós e do tipo de tráfego associado.

Portanto, a rede de comunicação de um NCS deve possuir algumas características essenciais:

- capacidade de suportar fluxos de mensagens periódicas, de forma a transferir dados periódicos relacionados com o controle (por exemplo, dados de leitura periódica de um grupo de sensores);
- capacidade de garantir um tempo de resposta com limite superior para transferência de mensagens entre os nós, de forma a respeitar os atrasos máximos de controle relacionados às malhas de controle;

- capacidade de garantir um comportamento temporal previsível na presença de carga de rede variável por causa do tráfego não relacionado à aplicação de controle (tais como: alarmes, fluxos de vídeo relacionados com a vigilância de instalações, etc).

Ao utilizar uma rede de comunicação para suportar aplicações de controle ocorrem variações no intervalo de tempo gasto entre transferências consecutivas de mensagens pertencentes a um mesmo fluxo periódico, o *jitter*. O serviço de tempo real fornecido pela rede de controle deverá garantir que, apesar desta variabilidade, as mensagens serão sempre transferidas antes das respectivas metas temporais (*deadlines*).

Quando existem problemas de concorrência entre tarefas (nós) ou entre mensagens (na rede de comunicação), a utilização de um kernel de tempo real e de uma rede de comunicação que forneça um serviço de tempo real, não são suficientes para garantir uma latência de execução e comunicação bem definidas e conseqüentemente manter o desempenho e a estabilidade nas malhas de controle. As mensagens geram atrasos no período de amostragem e nos eventos de medição/ atuação e conseqüentemente *jitter* em função dos atrasos de transmissão. Esta variação dos atrasos de comunicação impõe uma variação de tempo para o atraso de execução do controle, que é definido como *jitter de controle*, que tem uma forte influência sobre a estabilidade e desempenho de um NCS (SANTOS, 2004b).

1.5.2 Escalonamento de Mensagens em Tempo-Real

O escalonamento de mensagens de tempo real em redes de comunicação baseia-se na teoria de escalonamento de tarefas em tempo real para um dado conjunto de nós que desejam transmitir suas mensagens, concorrendo assim pela posse do canal de comunicação. Um protocolo de acesso ao meio determinista faz-se necessário para que a transmissão da mensagem seja realizada dentro de um prazo limite bem definido (*deadline*).

Semelhante ao escalonamento de tarefas, quanto à falta de deadline na transmissão de mensagens, os sistemas de comunicação de tempo real podem ser classificados em:

- Sistemas de Comunicação de Tempo-Real Críticos (*Hard real-time communication systems*): sistemas de comunicação nos quais as mensagens devem ser transmitidas antes de um deadline, e a falta deste pode levar a conseqüências danosas ao sistema.
- Sistemas de Comunicação de Tempo-Real Não Críticos (*Soft real-time communication systems*): sistemas de comunicação nos quais as mensagens podem até não

cumprir o seu deadline, podendo o sistema ainda manter sua operação com uma desempenho degradada (LIU; LAYLAND, 1973).

Para fornecer um requisito de transmissão de tempo real, a camada física e de aplicação obedecem às mesmas funcionalidades do modelo RM-OSI. Porém o protocolo de Controle de Acesso ao Meio (MAC) deverá ter um caráter determinista de acesso ao meio e a subcamada de Controle do Enlace Lógico (LLC) um mecanismo de atribuição de prioridades sob um conjunto de mensagens, ou seja, a arquitetura em si não se modificou, mas sim as propriedades das subcamadas de enlace.

Um protocolo MAC que garante a determinação do tempo de transmissão é um dos critérios mais importantes para que seja possível determinar o atraso de controle em cada ciclo. A arquitetura de uma rede de comunicação de tempo-real deverá obedecer ao modelo mostrado na Figura 1.5.

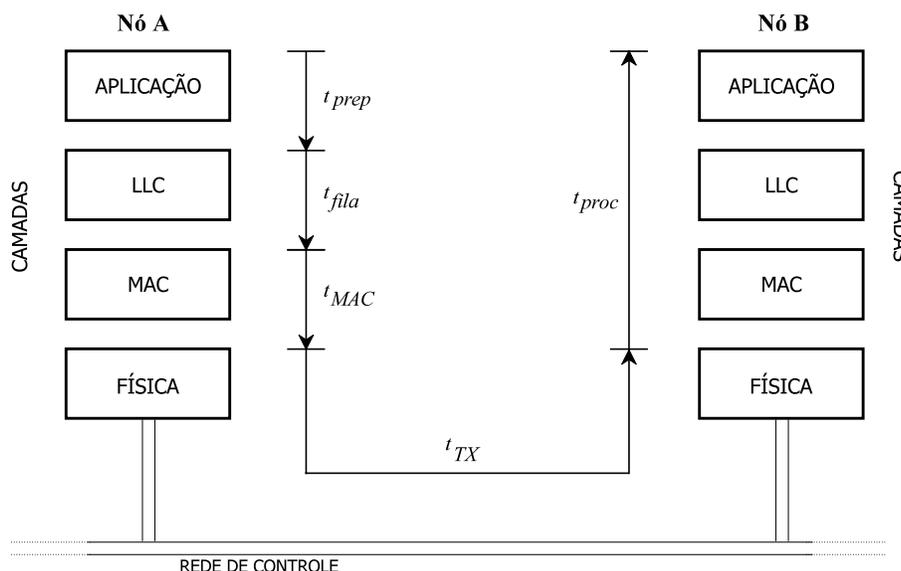


Figura 1.5: Arquitetura de rede de comunicação de dados baseado no modelo de 4 camadas

A latência de transmissão de uma mensagem M_m , do Nó A para o Nó B consiste na soma de latências de preempção (t_{prep}), fila de mensagens que desejam ser transmitidas em um nó específico (t_{fila}) e MAC no emissor (t_{MAC}) é o tempo relativo ao escalonamento das mensagens, quando várias mensagens pretendem acessar simultaneamente ao meio de comunicação (t_{TX}) e latência de processamento no receptor (t_{proc}). Todas estas unidades são dadas em segundos.

A eq. (1.1) apresenta o atraso total para a transmissão de uma instância k da mensagem m sob uma rede de comunicação.

$$t_m^k = t_{prep,m}^k + t_{fila,m}^k + t_{MAC,m}^k + t_{TX,m}^k + t_{proc,m}^k \quad (1.1)$$

Para o caso de não haver concorrência de mensagens na fila de transmissão e acesso ao meio de comunicação deve-se considerar t_{fila}^k e t_{MAC}^k iguais a zero. Um fluxo de mensagens periódicas de tempo-real M_m pode ser caracterizada pelo comportamento temporal apresentado na Figura 1.6.

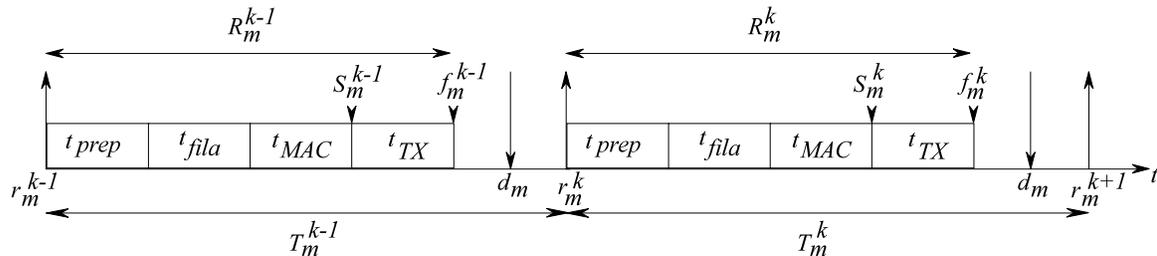


Figura 1.6: Propriedades temporais de uma mensagem periódica de tempo-real

Um fluxo de mensagens de tempo real M_i pode ser caracterizada por alguns parâmetros que influenciam no seu tempo de resposta, conforme descrito na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Parâmetros de mensagens de comunicação em tempo-real

Parâmetro	Descrição
C_m	Tempo de transmissão de uma mensagem
T_m	Período de transmissão da mensagem
t_{prep}	Tempo de preparação de mensagem
t_{fila}	Atraso na fila de transmissão de mensagem
t_{MAC}	Tempo que o nó aguarda para ter posse do meio
t_{TX}	Tempo de transmissão da mensagem
s_m	Instante em que uma mensagem inicia sua transmissão
f_m	Instante em que uma mensagem finaliza sua execução
R_m	Tempo de resposta da mensagem
d_m	Deadline de uma mensagem

Para uma rede CAN, por exemplo, o tempo de resposta no pior caso de uma mensagem enfileirada, medida desde a chegada de uma requisição da mensagem para a fila de saída até o instante em que a mensagem é completamente transmitida, é dado por:

$$R_m = J_m + w_m + C_m. \quad (1.2)$$

O termo C_m representa o tempo gasto para se transmitir uma mensagem m fisicamente

sobre o barramento. O pacote de uma mensagem CAN básica contém 47 bits de dados complementares (*overhead*) por mensagem e 5 bits de preenchimento (*stuffing*) do quadro de mensagens, sendo apenas 34 bits dos 47 bits de *overhead* que estão sujeitos ao *stuffing*.

1.6 Estado da Arte em Sistemas de Controle via Redes

Sistemas de controle convencionais (analógicos) utilizam sinais analógicos e contínuos para transmissão das grandezas em uma malha de controle. Em um sistema de controle por computador, a malha de controle é fechada por uma rede de comunicação de dados, na qual os elementos sensor, atuador e controlador trocam informações por meio da passagem de mensagens.

A substituição dos sistemas de controle convencionais por sistemas de controle por redes é motivada pela redução dos custos da fiação, manutenção, descentralização do controle e pela grande disponibilidade e baixo custo da tecnologia de redes de comunicação de dados (CHAN; OZGUNER, 1995) e (ZHANG; BRANICKY; PHILLIPS, 2001).

Sistemas de controle via redes constituem uma classe de sistemas de controle diferente dos tradicionais sistemas de controle por computador, pois a rede de comunicação, do tipo compartilhada com transmissão na forma de difusão, introduz atrasos na transmissão de mensagens, o que acarreta atrasos nos tempos de amostragem, atuação ou execução nas malhas de controle comprometendo assim o desempenho e a estabilidade do sistema em malha fechada (HALEVI; RAY, 1988), (NILSSON; BERNHARDSSON; WITTENMARK, 1998) e (TORNGREN, 1998).

A utilização de Sistemas de Controle via Redes também permite a distribuição do processamento e possibilita que o controle de processos e sistemas seja feito de forma remota. Ao controlar remotamente processos situados em locais diversos, usando a rede como meio físico de comunicação, torna-se possível a concentração ou distribuição de esforços na execução de algoritmos e na sintonia destes controladores, que podem ser implementados em qualquer local atendido pela rede em questão.

O problema é que, sendo a rede de comunicação compartilhada, não há garantia de regularidade de tempo nos processos de medição e de atuação. Tendo em vista que os controladores digitais convencionais são projetados assumindo período de amostragem constante (amostragem e controle disparados por tempo), erros no cálculo e na implementação do sinal de controle ocorrerão em função dos atrasos provocados pela rede de

comunicação.

Para que os sistemas de controle via redes possam ser implementados é necessário o uso de técnicas que possibilitem torná-los robustos frente aos efeitos dos atrasos provocados pelo meio de transmissão.

O estudo de sistemas de controle via redes teve início na década de 1980, quando surgiram os primeiros trabalhos teóricos e práticos sobre o assunto (HALEVI; RAY, 1988), (RAY; HALEVI, 1988), (RAY; HALEVI, 1988) e (JOTA, 1987). Os NCSs são abordados sob vários aspectos e com variados enfoques na literatura científica. São analisadas questões como o projeto e implementação de controladores, questões relativas aos atrasos, estabilidade, sincronização, escalonamento, etc. (TORNGREN, 1998), (NILSSON; BERNHARDSSON; WITTENMARK, 1998) e (TIPSUWAN; CHOW, 2003).

Vários trabalhos consideram condições simplificadas ou idealizadas, alguns autores assumem, por exemplo, que a rede de comunicação atua de forma síncrona e, ainda, com taxas de amostragem iguais para sensores, controladores e atuadores. Infelizmente, na prática, isto raramente ocorre. Outras simplificações são feitas visando facilitar o entendimento dos problemas em NCS, tais como considerar que: as trocas de informações na rede são livres de erros de transmissão, todas as mensagens são do mesmo tamanho, o tempo de processamento nas unidades é constante, o atraso computacional é constante e muito menor que o período de amostragem, a rede está sempre livre para envio e recepção dos dados e cada informação é enviada em um quadro de mensagens único (e.g. (TIPSUWAN; CHOW; VANIJIRATTIKHAN, 2003), (TIPSUWAN; CHOW, 2004), (CHEN; LIU; YIN, 2005), (VOZDOLSKY; DJAFERIS, 2005) e (CHANDRA; LANGBORT; D'ANDREA, 2005)).

As pesquisas sobre análise e modelagem de NCSs foram conduzidas com base em sistemas de tempo contínuo e de tempo discreto, sendo mais natural realizar a análise de um NCS na forma de tempo discreto. A maioria dos trabalhos e pesquisas na área de controle automático consideram os sistemas de controle como sendo dos tipos periódico ou disparado por tempo, nos quais os sinais reais da planta são representados pelos valores regularmente amostrados. No entanto, existem casos em que é interessante considerar sistemas de controle em que a amostragem seja desencadeada por evento e não por tempo. Estes sistemas são conhecidos por controladores baseados em eventos ou ainda por sistemas de controle assíncronos ou não periódicos. Nestes sistemas de controle, a ocorrência de um evento, geralmente quando o valor medido ultrapassa uma determinada faixa de *setpoint*, é que dispara a amostragem do controlador. Estes sistemas tornam-se particularmente interessantes em situações nas quais a manutenção de um período de amostragem

fixo é complicada, como por exemplo, nos casos dos NCSs (ALBERT, 2004) e (TARN; XI, 1998). Este conceito de controle assíncrono representa uma quebra de paradigma do controle digital clássico: a não periodicidade da amostragem. No trabalho de Arzen (ARZEN, 1999), por exemplo, é apresentado o desenvolvimento de um controlador PID baseado em eventos. Foi demonstrado pelo autor, por meio de simulações, que a aplicação do controlador proporcionou grandes reduções na utilização da CPU às custas de uma pequena degradação no desempenho do controlador.

Para a representação dos sistemas e projeto dos controladores são utilizadas basicamente a representação por Entradas e Saídas e por Espaço de Estados (MONTESTRUQUE; ANTSAKLIS, 2003), sendo mais comum a utilização de espaço de estados (CHOW; TIPSUWAN, 2001), (WANG et al., 2004), (WANG; WANG; MA, 2004) e (BRANICK; PHILLIPS; ZHANG, 2000), principalmente nos estudos que envolvem análise de estabilidade, e.g. (WU; DENG; GAO, 2005) e (WU; DENG; GAO, 2005).

Várias técnicas de controle vêm sendo empregadas em NCSs visando a melhoria de desempenho e estabilidade desses sistemas. A primeira grande questão relativa aos NCSs diz respeito aos atrasos induzidos na rede e a representação dos sistemas sujeitos a esses atrasos, algumas formas de representação dos atrasos e dos sistemas são apresentadas em (ZHONG, 2004b), (ZHONG, 2005), (ZHONG, 2004a), (WU; DENG; GAO, 2005), (ZHONG, 2006) e (ZHONG, 2003). Grande parte dos trabalhos propostos utiliza algum mecanismo para a estimação ou predição das grandezas afetadas pelos atrasos na medição, como por exemplo utilização de um vetor de estados aumentado, que abriga as grandezas medidas e permite a estimação dos valores atrasados ou ausentes, e.g. (TIPSUWAN; CHOW, 2003) e (HALEVI; RAY, 1988). A utilização de estimadores e preditores baseados no modelo da planta também é uma metodologia utilizada para fornecer valores estimados da saída da planta para o controlador na ausência dos valores reais (KIM; JI; AMBIKE, 2005), (LIU et al., 2004), (WANG et al., 2003), (CHEN; LIU; YIN, 2005), (MONTESTRUQUE; ANTSAKLIS, 2003) e (MU; CHU; WANG, 2004). Outra forma utilizada para tentar compensar os atrasos de medição e atuação é a utilização de *buffers* que tornam os atrasos determinístico, tornando o sistema invariante no tempo, e.g. (LUCK; RAY, 1990), (NILSSON; BERNHARDSSON; WITTENMARK, 1988) e (CHAN; OZGUNER, 1995). Uma outra metodologia para controle de NCSs com atrasos aleatórios trata os efeitos destes atrasos como um problema linear quadrático gaussiano (LQG) e o projeto do controlador é feito com base nas técnicas de controle estocástico ótimo (NILSSON; BERNHARDSSON; WITTENMARK, 1988), (CHEN et al., 1998), (HIRANO et al., 2005), (ZHEN; JIAN-YING, 2002), (ZHANG et al., 2005), (NILSSON, 1998), (WITRANT; GEORGES; WIT, 2006) e (GUPTA; HASSIBIA; MURRAY, 2007).

Para o projeto dos controladores em NCSs são utilizadas várias técnicas clássicas e avançadas, os NCSs podem ser considerados sistemas lineares ou não-lineares, dependendo da abordagem utilizada, os controladores podem ser disparados por tempo ou por evento, com períodos de amostragem fixos ou variáveis, etc. A aplicação de controladores clássicos, com a estrutura PID é apresentada em (TIPSUWAN; CHOW; VANIJJIRATTIKHAN, 2003), (TIPSUWAN; CHOW, 2004), (HU; LIU; REES, 2006), (POHJOLA, 2006) e (ARZEN, 1999). Projetos de controladores por alocação de pólos são apresentados em (TIPSUWAN; CHOW; VANIJJIRATTIKHAN, 2003), (TIPSUWAN; CHOW, 2004) e (MU; CHU; WANG, 2004). No trabalho de Santos (SANTOS, 2004b) é apresentada uma metodologia para o projeto de NCS com período de amostragem e atraso de entrada-saída pré-definidos a partir do tempo de resposta no pior caso (WCRT) e o projeto de NCS baseado no conceito de margem de *jitter* (ver em (CERVIN et al., 2004)) por meio de um algoritmo iterativo para seleção do período de amostragem com diversas malhas de controle fechadas sob uma rede de comunicação em tempo real. A análise do *jitter* também é utilizada em (PEREZ; MORENO; MONTEZ, 2006) para o desenvolvimento de um algoritmo de controle com garantia de estabilidade. Já a metodologia apresentada por Walsh e colaboradores (ZHANG; BRANICKY; PHILLIPS, 2001) e (WALSH; YE; BUSHNELL, 1999) utiliza teoria de sistemas não-lineares e de perturbação para formular os efeitos dos atrasos provocados pela rede em um NCS, podendo ser aplicado em sistemas com atrasos T_{SC} periódicos ou aleatórios. Uma outra abordagem da aplicação de técnicas não-lineares para NCSs é apresentada em (YU; XIE; WANG, 2004).

Várias técnicas que utilizam períodos de amostragem variáveis são apresentadas na literatura, dentre eles (HONG, 1995), (BILBAO-GUILLERNA; SEN; ALONSO-QUESADA, 2008), (DUAN et al., 2008), (MIZUOCHI; TSUJI; OHNISHI, 2005), (GLASSON, 1983) e (YANG; YANG, 2007). Outra abordagem muito utilizada para projeto de controladores em NCSs é a de controladores robustos em função da sua característica de trabalhar em sistemas que apresentam incertezas (ZHONG, 2003), (GOKTAS, 2000), (VOZDOLSKY; DJAFERIS, 2005), (WITHEEPHANICH; PIYARAT; TARASANTISUK, 2004), (WANG; GOLDSMITH; TAN, 2007) e (BORGES et al., 2008). Dentro da área de controle robusto, a utilização de desigualdade matricial linear (LMI) é apresentada em vários trabalhos, dentre eles (YANG et al., 2006), (HU et al., 2007), (WANG; GOLDSMITH; TAN, 2007) e (GAO; CHEN; LAM, 2008).

A utilização de controladores baseados na lógica Fuzzy foi apresentada nos trabalhos (ALMUTAIRI; CHOW; TIPSUWAN, 2001), (LEE; LEE; LEE, 2003), (LIA; FANG, 2006), (ZHANG; YANG; CHAI, 2007) e (LIU et al., 2004). A metodologia de controle adaptado ao usuário final foi apresentada por Tipsuwan e Chow (TIPSUWAN; CHOW, 2001) e tem como conceito

principal a adaptação dos parâmetros do controlador às necessidades do usuário final em relação às condições de carga da rede ou qualidade de serviços (QoS) exigidos.

Estruturas de controle preditivas e adaptativas aplicadas aos NCSs são mostradas nos trabalhos de (BELDIMAN; WALSH; BUSHNELL, 2000), (WALSH; YE, 2001), (HU; LIU; REES, 2006), (KIM; JI; AMBIKE, 2005), (ZHONG, 2003) e (ZHAO; LIU; REES, 2008). Várias propostas utilizam o Preditor de Smith (SMITH, 1957), (WATANABE; ITO, 1981) e (PALMOR, 1996) como arranjo de compensação dos atrasos do NCS. O preditor de Smith é uma ferramenta eficaz na redução de problemas relacionados a atrasos e tempo morto para sistemas LTI estáveis com uma saída ou uma entrada relacionada com o atraso em questão. No trabalho de Martins (MARTINS, 2001) podem ser observadas algumas aplicações deste preditor. O controlador preditivo generalizado (GPC) também é apresentado como opção para controle de NCSs (LOONTANG; SILVA, 2006), (LU et al., 2006), (CAN et al., 2006) e (LIU et al., 2006). Várias outras propostas de algoritmos de controle preditivos são apresentadas na literatura científica em (SRINIVASAGUPTA; SCHATTLERB; JOSEPH, 2004), (XIONG; YU; YU, 2005), (CAN et al., 2006), (HASSAPIS, 2006), (LIU et al., 2007b), (CHEN; LIN; HWANG, 2007) e (LIU et al., 2007a).

Alguns esquemas com controladores do tipo IMC (*Internal Model Control*) são apresentados e utilizados para estabilizar NCSs com atrasos variáveis. Os controladores IMC possuem qualidade na rejeição de distúrbio e desempenho robusto (LIU et al., 2004) e (MONTESTRUQUE; ANTSAKLIS, 2004). Com a utilização desses controladores é possível a separação dos problemas de convergência do modelo e de regulação.

Embora a análise de estabilidade faça parte do projeto dos controladores e foi abordada na grande maioria dos trabalhos citados anteriormente, alguns trabalhos tratam desse tema de forma mais aprofundada. A aplicação de LMIs para a análise de estabilidade é apresentada em vários trabalhos, e.g. (BRANICK; PHILLIPS; ZHANG, 2000), (YU; XIE; WANG, 2004), (XIE; WANG, 2004), (YU et al., 2004), (LIU; REES, 2005), (ZHANG et al., 2005), (CLOOSTERMAN et al., 2007), (GARCÍA-RIVERA; BARREIRO, 2007), (CLOOSTERMAN et al., 2008) e (BORGES et al., 2008). Em Kao e Lincoln (KAO; LINCOLN, 2004) é apresentado um critério gráfico simples para análise da estabilidade, em sistemas com atrasos variantes no tempo, que pode ser utilizado para verificação da robustez em sistemas com esta característica de atraso. Montestruque e Antsaklis (MONTESTRUQUE; ANTSAKLIS, 2004) fazem a análise da estabilidade dos sistemas de controle via redes pelo conceito de estabilidade assintótica de Lyapunov. O NCS é considerado um processo estocástico e os tempos de transmissão são formatados em uma cadeia de Markov, as

condições suficientes para a estabilidade do sistema são derivadas a partir dos limites de estabilidade de Lyapunov. Outros trabalhos também analisam a estabilidade dos NCSs por Lyapunov, tais como (NESIC; TEEL, 2004), (ZHU et al., 2005) e (CARNEVALE; TEEL; NESIC, 2007).

Uma nova arquitetura de NCS foi apresentada no trabalho de Goodwin e colaboradores (GOODWIN; QUEVEDO; SILVA, 2008). A estrutura proposta utiliza a parametrização de Youla (MORARI; ZAFIRIOU, 1989) para predição dos atrasos da rede entre sensor e controlador. Comparando-se os desempenhos de um NCS convencional, com enlace de rede apenas entre sensor e controlador e o NCS Youla, este último apresentou melhor desempenho, segundo os autores. Considerando um NCS com canal de comunicação de capacidade limitada, Tian e colaboradores (TIAN; YUE; PENG, 2008) propuseram um novo modelo para descrever uma rede de comunicação em condições não ideais e a quantização dos estados de entrada e saída do sistema em um *framework* unificado. Um controlador baseado em observador é desenvolvido a partir do modelo proposto. Esse controlador é obtido por meio de uma inequação matricial não-linear derivada de regras de estabilização assintótica do NCS.

Aplicações de estruturas NCSs que utilizam a Internet como rede de comunicação são apresentadas em vários trabalhos. No trabalho de Luo e Chen (LUO; CHEN, 2000), são apresentados alguns resultados e problemas relacionados com a aplicação do controle direto via Internet. A sugestão apresentada pelos autores é um controlador com conceito de programação dependente do comportamento da rede. Um laboratório de controle, com capacidade de parametrização dos controladores via Internet, foi apresentado no trabalho de Ko e colaboradores (KO et al., 2001). Yang e colaboradores (YANG; CHEN; ALTY, 2003) apresentam e investigam as cinco questões fundamentais para a implementação de um NCS via Internet: especificação de necessidades, seleção da arquitetura, projeto da interface baseada na web, supervisão do controle e verificação dos sistemas de segurança. O trabalho ainda apresenta uma metodologia de projeto para sistemas de controle baseados na Internet. Outras aplicações de NCSs com Internet são apresentadas em (TIAN; YUB; FIDGE, 2007), (YANG; YANG, 2007) e (CHAI et al., 2008).

Um sistema distribuído, denominado Plataforma CMUF (Centro de Monitoramento de Usos Finais), que também utiliza a Internet como parte da rede de comunicação, foi desenvolvido com a finalidade de monitoração e controle remoto de cargas elétricas (JOTA et al., 2000), (JOTA; JOTA; NOBRE, 2002), (JOTA; JOTA; NOBRE, 2005), (MARTINS et al., 2006) e (MARTINS et al., 2007). Nessa plataforma já foram desenvolvidos vários traba-

lhos na área de sistemas distribuídos e controle de processos, dentre eles (RAPP, 2002), (KAZMAIER, 2003), (SANTOS, 2004a) e (SILVA, 2004). Utilizando a plataforma CMUF foi desenvolvido um sistema de monitoramento de variáveis ambientais e de controle para uma unidade de condicionamento de ar. No trabalho de Batista (BATISTA, 2006) foi implementado um controlador PI, com possibilidade de alteração remota de parâmetros, via Internet. Mais informações sobre esta plataforma são apresentadas na seção 2.3.2.

Neste trabalho de doutorado são utilizadas várias das técnicas discutidas anteriormente e, à elas, são adicionadas contribuições importantes. A técnica de estimação de valores para a saída da planta, amplamente discutida em trabalhos anteriores, é empregada neste trabalho de doutorado com algumas modificações importantes, dentre elas a representação por transformada delta (GOODWIN; MIDDLETON, 1992) que permite a incorporação dos atrasos na equação do estimador, aumentando sua precisão. O estimador desenvolvido também apresenta como diferencial a utilização de mecanismos de atualização das variáveis. Um controlador com compensação explícita do sinal de controle é desenvolvido neste trabalho e representa uma contribuição na área de controladores para NCSs. A partir do algoritmo clássico de estimação de parâmetros por mínimos quadrados recursivo foi desenvolvido um estimador de parâmetros específico para NCSs. Esse estimador apresenta como inovação a utilização de informações sobre os instantes de medição da saída da planta e aplicação dos sinais de controle para montagem da matriz de regressores. As técnicas desenvolvidas foram testadas em aplicações reais e os resultados obtidos corroboram sua validade nas condições avaliadas.

1.7 Estrutura do Trabalho

Esta tese está assim dividida:

Capítulo 1: Introdução

No Capítulo 1, os objetivos e a motivação do trabalho e uma breve discussão sobre os problemas relacionados com sistema de controle via redes é apresentada. Neste capítulo também é feito um estudo sobre o estado da arte em sistemas de controle via redes e a revisão bibliográfica com os mais importantes trabalhos e pesquisas desenvolvidos na área é apresentada.

Capítulo 2: Descrição das Plantas e das Plataformas Utilizadas

Nesse Capítulo é feita a descrição das três plantas e das duas plataformas NCS utilizadas para o levantamento dos efeitos dos atrasos em sistemas de controle via redes e para o desenvolvimento das propostas de sistemas de controle.

Capítulo 3: Projeto dos Controladores e Estimadores para NCSs

O Capítulo 3 mostra a representação matemática dos controladores, estimadores e preditores utilizados para testes e para a formulação das estratégias de controles a serem propostas.

Capítulo 4: Estratégias de Controle Propostas

No Capítulo 4 são apresentadas duas propostas para sistemas de controle via redes: um sistema de controle com compensação explícita do sinal de controle e um sistema de controle preditivo e adaptativo via redes.

Capítulo 5: Resultados Emulados e Experimentais

Nesse Capítulo são mostrados os efeitos práticos dos atrasos provocados pela rede em uma malha de controle do tipo NCS. Também são apresentados resultados simulados e experimentais obtidos a partir da implementação dos dois algoritmos de controle via redes propostos, incluindo uma análise preliminar de estabilidade para uma determinada condição operacional.

Capítulo 6: Conclusões

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Descrição das Plantas e das Plataformas Utilizadas

2.1 Introdução

Para a realização dos estudos sobre a influência dos atrasos e dos testes dos controladores nos sistemas de controle via redes são utilizadas, neste trabalho, três plantas e duas plataformas. A utilização de três plantas diferentes, sendo duas emuladas e uma física, tem por objetivo avaliar a influência dos atrasos e o desempenho dos controladores testados em condições operacionais distintas. Como plataforma de testes é utilizada, inicialmente, uma configuração que emula os atrasos induzidos pela rede, permitindo o controle sobre os valores de tempo equivalentes aos atrasos T_{SC} e T_{CA} em um NCS, possibilitando o estudo detalhado da influência destes atrasos num sistema em malha fechada. Posteriormente é utilizada uma plataforma NCS constituída por três nós independentes (sensor, controlador e atuador) interligados por uma rede CAN e, eventualmente, conectada a outras redes de comunicação, inclusive à Internet, por meio de um adaptador (*gateway* de comunicação). A utilização de uma plataforma NCS autêntica tem por objetivo avaliar técnicas de controle via redes em um ambiente real.

As plantas e as plataformas utilizadas neste trabalho serão apresentadas nas seções 2.2.1 a 2.3.2.

2.2 Plantas

2.2.1 Planta 1

Esta planta é um circuito RC série que tem por objetivo emular o comportamento dinâmico de uma variável com características equivalentes a de um sistema de primeira ordem. Esta planta apresenta como vantagens ser de fácil modelagem e apresentar menor

interferência a ruídos externos. Estas duas características permitem uma maior repetibilidade dos testes e uma melhor análise dos dados obtidos, já que as condições externas tem pouca influência no comportamento desta planta. A Figura 2.1 mostra o arranjo do circuito RC, com seus respectivos valores, denominado Planta 1. O arranjo mostrado nesta figura possui ganho unitário e constante de tempo igual 32,47 segundos (será utilizado o valor truncado para 32,5 s).

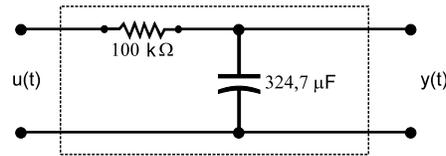


Figura 2.1: Circuito RC que representa a Planta 1

A função de transferência que representa a Planta 1, um modelo de 1ª ordem, é dada pela eq. (2.1):

$$G_1(s) = \frac{1}{32,5s + 1} \quad (2.1)$$

A Figura 2.2 apresenta o diagrama de conexão da Planta 1 à Plataforma Didática (descrita na seção 2.3.1) utilizada como plataforma NCS em conjunto com a planta. Na figura são apresentados os conversores A/D e D/A dos cartões analógicos utilizados na digitalização dos sinais elétricos e suas respectivas faixas de valores. Em função das escalas de tensão utilizadas nos conversores A/D (0 a 10 V) e D/A (0 a 5 V) da plataforma, o ganho nominal da Planta 1 passaria a ser de 0,5. Um sinal de 100% na entrada da planta, equivalente a 5 V ou a 4095 em valor decimal, resulta em um sinal de 2047, em valor decimal, na saída da planta, ou seja, 50% da escala. O valor medido para o ganho da planta Planta 1, porém, foi de 0,4925, que será o valor considerado.

Considerando um extrapolador de ordem zero (ZOH), que inclui os conversores A/D e D/A utilizados na digitalização dos sinais elétricos, um intervalo de amostragem de 5 segundos e aplicando a Transformada z (PHILLIPS; NAGLE, 1995) em eq. (2.1), porém considerando o ganho de 0,4925, a equação que representa a Planta 1 em z é dada por (eq. 2.2)

$$G_1(z) = \frac{0,0702}{z - 0,8574} \quad (2.2)$$

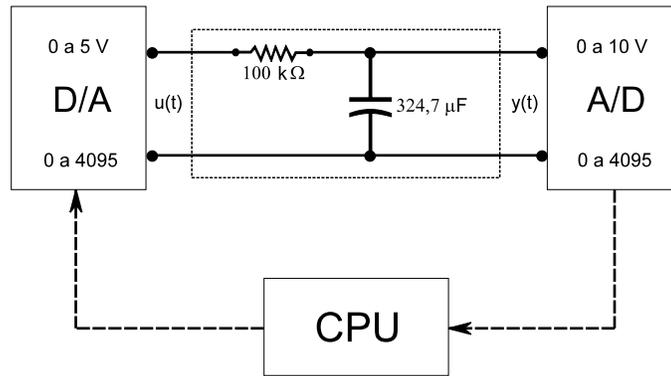


Figura 2.2: Diagrama de conexão da Planta 1 com a Plataforma Didática

2.2.2 Planta 2

Esta planta também é um circuito RC série, a exemplo da planta anterior, porém apresenta uma constante de tempo menor que a Planta 1. A Figura 2.3 mostra o arranjo do circuito RC, com seus respectivos valores, denominado Planta 2. O arranjo mostrado nesta figura possui ganho unitário e constante de tempo igual 1,5 segundos.

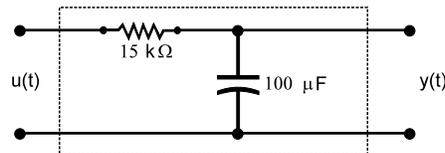


Figura 2.3: Circuito RC que representa a Planta 2

A função de transferência que representa a Planta 2, um modelo de 1ª ordem, é dada pela eq. (2.3):

$$G_2(s) = \frac{1}{1,5s + 1} \quad (2.3)$$

Considerando um extrapolador de ordem zero (ZOH), que inclui os conversores A/D e D/A utilizados na digitalização dos sinais elétricos, um intervalo de amostragem de 150 milissegundos e aplicando a Transformada z na eq. (2.3), a equação que representa a Planta 2 em z é dada por (eq. 2.4). Para um intervalo de amostragem igual a 125 milissegundos, a equação que representa a Planta 2, em z , é dada por (eq. 2.5).

$$G_{21}(z) = \frac{0,0952}{z - 0,9048} \quad (2.4)$$

$$G_{22}(z) = \frac{0,0797}{z - 0,9200} \quad (2.5)$$

2.2.3 Sistema de Tanques Interativos - STI

Para os testes de comportamento dos sistemas de controle via redes em uma planta física foi utilizado o Sistema de Tanques Interativos (STI) (BRAGA, 1994), montado no Laboratório de Controle de Processos da UFMG (LCPI-UFMG).

O conjunto de Tanques Interativos, que é mostrado na Figura 2.4, é um sistema constituído por 3 tanques, sendo dois tanques superiores (TQ02 e TQ03) e um inferior (TQ01) para reposição da água, usada como fluido circulante. Neste sistema, o problema de controle consiste em regular o nível e a vazão em partes específicas do processo. Os maiores problemas inerentes a este sistema são devidos às características do processo variarem com as condições operacionais (ganho do processo varia tanto com o nível quanto com a vazão); às constantes de tempo e o tempo morto apresentarem variações significativas com a vazão e as não-linearidades intrínsecas do processo e das válvulas e atuadores.



Figura 2.4: Foto do sistema de tanques interativos

Esta planta é denominada Tanques Interativos devido ao acoplamento existente entre os dois tanques superiores, TQ02 e TQ03. A intensidade deste acoplamento é controlada através de duas válvulas manuais. A circulação da água é conseguida pelas bombas centrífugas BA01 e BA02. A operação básica deste processo consiste em se bombear água do reservatório TQ01, através da bomba BA01, para o tanque TQ02. A água do tanque TQ02 flui para o tanque TQ03 pelo princípio de vasos comunicantes. A água do tanque TQ03 é bombeada, pela bomba BA02, de volta para o reservatório TQ01, completando o ciclo. O controle da vazão neste processo é feito pela variação da obstrução da linha por meio de válvulas de controle pneumáticas (BRAGA, 1994).

Dentre os vários subsistemas e as várias possibilidades de controle que a planta oferece foi escolhida a malha de vazão entre os tanques TQ03 e TQ01 para a implementação da técnica de controle NCS proposta, em função da reduzida constante de tempo (em torno de 1 segundo) e presença de tempo morto, permitindo avaliar a eficácia do sistema em uma situação com um grau de dificuldade interessante.

Para esta malha é utilizado um medidor do tipo turbina na medição da vazão, no qual a vazão é medida por meio da frequência de pulsos produzidos pelas aletas da turbina que interrompem um feixe de luz de um optoacoplador. Estes pulsos são convertidos, por um conversor de frequência/ tensão, em um sinal analógico (0 a 5 V). Este sinal analógico é medido pela placa sensora do sistema NCS-CMUF (seção 2.3.2). Como elemento final de controle é utilizada uma válvula pneumática comandada por um conversor corrente/ pressão. O sinal de corrente para o acionamento da válvula (4 a 20 mA) é produzido por um conversor tensão/ corrente, que recebe o sinal em tensão da placa atuadora do NCS-CMUF (0 a 5 V) e fecha o loop de corrente com o conversor da válvula na amplitude adequada.

As condições operacionais utilizadas são as seguintes:

- Vazão do TQ02 para o TQ01 por gravidade, ou seja, bomba BA02 desligada.
- Faixa de trabalho da válvula de abertura FCV02: 0 a 100%.
- Faixa de vazão: 2 a 11.76 l/min.
- Nível do TQ02: 45 a 65%.

Para as condições operacionais descritas anteriormente foi feito o teste de resposta ao degrau para a determinação do modelo matemático representativo do sistema. Foram

aplicados degraus crescentes de 10%, na entrada da planta, para a faixa de 0 a 100%. A estrutura utilizada para o modelo foi a de primeira ordem mais tempo morto. A eq. (2.6) mostra o modelo médio, utilizado para parametrização inicial dos controladores. A Figura 2.5 mostra o perfil dos parâmetros Ganho e Constante de Tempo, para a faixa de trabalho considerada.

$$G_{STI}(s) = \frac{0,75e^{-0,5s}}{1,3s + 1} \quad (2.6)$$

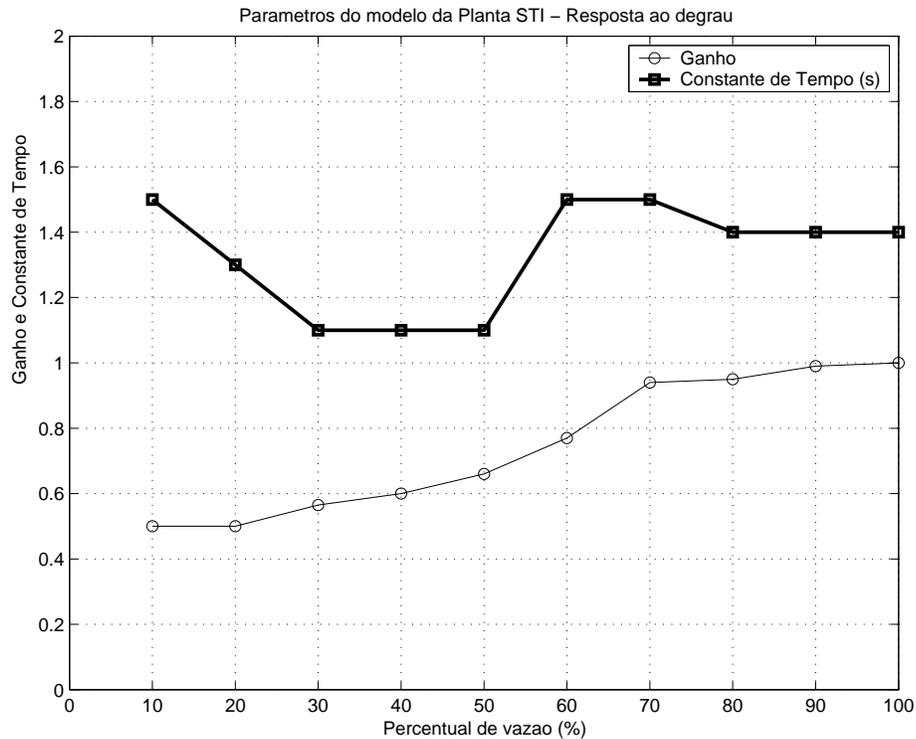


Figura 2.5: Variação dos Parâmetros do Modelo de Primeira Ordem para o STI

2.3 Plataformas

2.3.1 Plataforma Didática para Estudos de NCS

Para o estudo mais aprofundado da influência dos atrasos provocados pela rede em um sistema de controle via redes foi construída uma plataforma didática para realização de testes com atrasos controlados. O arranjo consiste da planta, com sensor e atuador, do controlador e das unidades de geração de atrasos variáveis (*buffers* 1 e 2), conforme mostra a Figura 2.6.

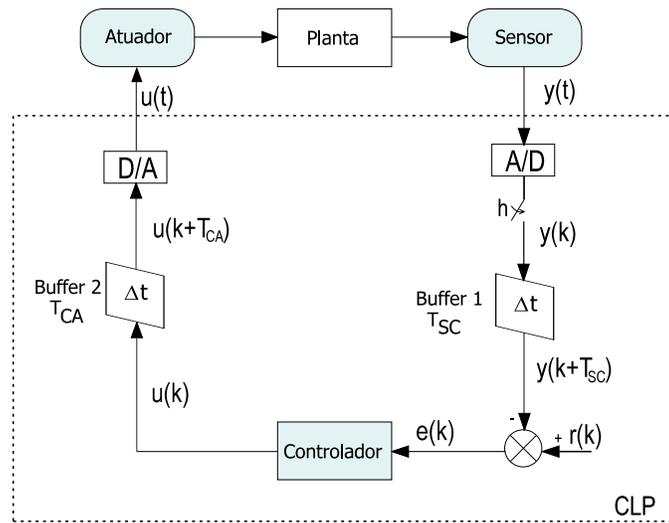


Figura 2.6: Malha de controle com adição de atrasos - Plataforma Didática

Em função da dificuldade em se controlar e medir os atrasos provocados por uma rede de comunicação real foram introduzidos, na plataforma didática de testes, duas unidades de geração de atrasos para “emular” os enlaces de rede entre sensor e controlador e entre controlador e atuador. Os valores de E/S são coletados em suas entradas e transferidos para suas saídas, com atrasos controlados, a partir de comandos manuais (botões de disparo) ou automáticos (funções matemáticas ou tabela de valores para disparo). Estas unidades de geração de atrasos, que nada mais são do que dois *buffers* do tipo fila ou FIFO (*First In First Out*), um para os valores medidos e outro para valores de atuação, permitem variar de forma isolada os valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} .

A plataforma didática foi implementada em um Controlador Lógico Programável (CLP), no qual a CPU funciona como o controlador; uma entrada do cartão de entradas analógicas funciona como módulo sensor e uma saída do cartão de saídas analógicas funciona como módulo atuador, conforme mostram as figuras 2.6 e 2.7. Na plataforma didática, todas as unidades possuem período de amostragem idênticos, h , e a sincronização é garantida pela disposição local e integrada dos elementos, uma vez que, no módulo de testes, os conversores A/D e D/A e o controlador estão no mesmo módulo do CLP. O sensor é disparado por tempo, o controlador, com estrutura PI, é disparado por tempo ou evento (dependendo do modo de operação considerado) e o atuador é disparado sempre por evento, que é a chegada de uma nova ação de controle. A cada instante de amostragem, valores medidos são adicionados ao Buffer 1 (acumulador de valores medidos) e, os valores calculados para sinal de controle, ao Buffer 2 (acumulador de valores de atuação). A partir do acionamento manual de dois botões de disparo, um para T_{SC} e outro para

T_{CA} , são produzidos sinais que transferem estes valores, respectivamente, do Buffer 1 para o controlador e do Buffer 2 para o atuador, reproduzindo assim uma condição semelhante à dos atrasos variáveis provocados pela rede.

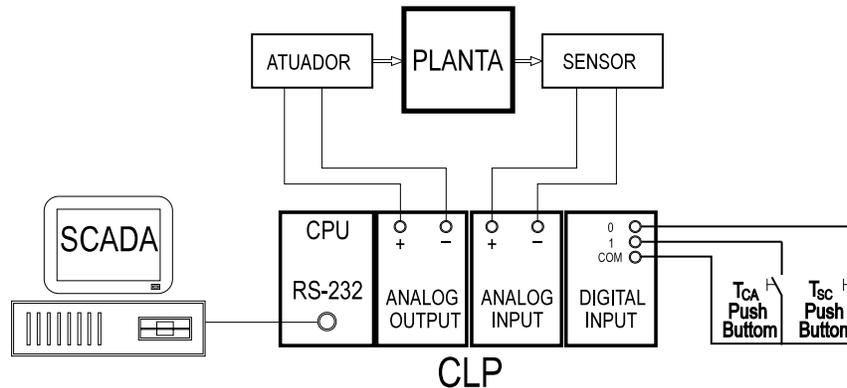


Figura 2.7: Hardware da Plataforma Didática para estudos de NCS

Para a medição do sinal de saída de uma planta conectada à plataforma didática, $y(t)$, é utilizada uma entrada analógica do CLP, que transfere o valor inteiro equivalente à medição realizada para a memória do CLP. O comando para a realização da leitura é disparado por tempo, um gerador de pulso (com período igual a um intervalo de amostragem, T_h) que é configurado para iniciar a sequência de execução do algoritmo de controle. A primeira tarefa é a medição da saída da planta. Medições disparadas por evento também podem ser realizadas, bastando associar o bloco de leitura da entrada da analógica, dentro do programa no CLP, a um sinal associado ao evento em questão. A cada medição de saída da planta um novo valor é armazenado no Buffer 1, um timer é disparado para registrar o tempo de retenção da medida. O tempo de retenção de cada medida no Buffer 1 representa o valor do atraso T_{SC} associado àquela medição. As funções de temporização normalmente disponíveis nos PLCs permitem a emulação de atrasos T_{SC} na faixa de 1 ms até dezenas de segundos; assim, a plataforma didática para estudos de NCS tem ampla faixa de aplicação nos mais variados cenários de atrasos.

Para a execução do algoritmo de controle são utilizadas funções aritméticas do CLP, que possibilitam o cálculo da lei de controle na forma discreta (equação de diferenças). No CLP, a lei de controle é implementada por meio de uma representação digital. Nos testes realizados nesta etapa do trabalho foram utilizadas as representações discretas com os operadores z (PHILLIPS; NAGLE, 1995) e δ (GOODWIN; MIDDLETON, 1992). O disparo da execução do algoritmo de controle pode ser feito por tempo, por evento ou por combinação de ambos. Ao final da execução do algoritmo de controle, o valor calculado para o sinal de controle, $u(k)$, é transferido para o Buffer 2 e, para cada entrada de novo valor no

buffer, um timer é disparado para registrar o tempo de retenção do sinal de controle. O tempo de retenção de cada sinal de controle no Buffer 2 representa o valor do atraso T_{CA} correspondente.

Estimadores de parâmetros e estimadores de valores para a saída da planta também podem ser adicionados ao algoritmo de controle. A plataforma, conforme apresentada, permite a implementação de variadas técnicas de controle digital para estudo do desempenho em um ambiente de controle via redes.

O valor da ação de controle, descarregada pelo Buffer 2 para o atuador, é transferida para uma saída analógica do CLP, que aplica um valor de tensão ou de corrente no elemento final de controle da planta. A efetivação da ação de controle no atuador pode ser disparada por tempo ou por evento. Nos testes realizados, foi utilizada a técnica de disparo por evento, na qual o atuador sempre atualiza sua saída ao receber uma nova ação de controle.

2.3.2 Plataforma NCS-CMUF

O Centro de Monitoramento de Usos Finais (CMUF) é uma plataforma de monitoramento de grandezas elétricas e ambientais que utiliza uma estrutura de sistema distribuído com arquitetura aberta e que pode ser utilizada para supervisão e controle de processos. A plataforma do CMUF foi desenvolvida de forma a ter baixo custo de construção e operação e ao mesmo tempo ser robusta. Sistemas de monitoramento contínuo foram projetados, desenvolvidos e instalados em algumas edificações selecionadas. O “Centro de Monitoramento de Usos Finais” (CMUF) encontra-se distribuído por todas as edificações e laboratórios envolvidos sendo composto pela associação de todas essas edificações interligadas via Internet.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo de configuração para a plataforma CMUF. Os elementos Ti, RH, Te, C, V e I representam as unidades de medição e os elementos PWM representam as unidades de atuação. Os elementos de medição e atuação são conectados às estações microcontroladas que podem desempenhar as funções de controle ou transmissão. As estações microcontroladas são interligadas entre si por meio de uma rede CAN. Para conexão à Internet é utilizado um micro servidor Web (*webserver*) conectado por meio de um *gateway* de comunicação à rede CAN. O *webserver* desempenha o papel de “mestre” fazendo requisições às estações de medição, aos quais estão acoplados os sensores (Te: “Temperatura externa”, Ti: “Temperatura interna”, I: “Corrente”, V: “Tensão”, RH: “Umidade”, C: “Claridade”, etc). Os dados coletados são enviados, via Internet, para o

banco de dados do CMUF. Depois de armazenadas no banco de dados, as informações ficam disponibilizadas aos usuários cadastrados por acesso remoto (via Internet). Este acesso é realizado através de uma página Web.

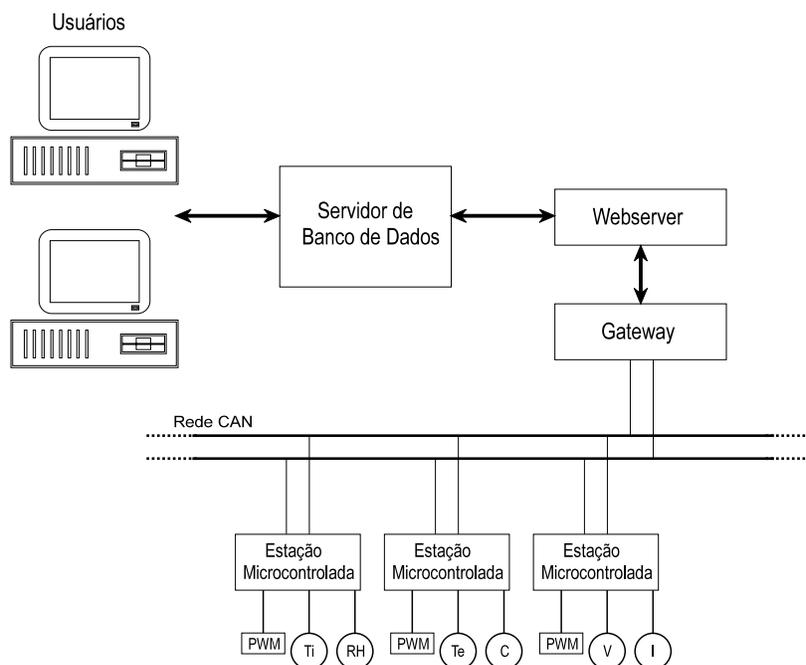


Figura 2.8: Exemplo de configuração para o sistema do CMUF

Estratégias de atuação e controle devem ser consideradas para a implementação efetiva de ações que minimizem o consumo energético. O desenvolvimento de técnicas de controle utilizando a plataforma do CMUF é contexto muito promissor, pois a plataforma pode disponibilizar uma variada gama de informações e recursos, tais como: relatório em tempo real de eventos e status (diagnose de falhas); identificação “online” dos parâmetros dos modelos do sistema de condicionamento do ambiente; utilização de intertravamentos (como por exemplo, abertura de janelas no controle de condições ambientais) (MARTINS et al., 2007); e, para qualquer grande alteração percebida nas condições do ambiente pelo sistema de controle, pode-se utilizar as informações do banco de dados para análise das condições ambientais nas proximidades da edificação, e efetuar comparações com medições de outros prédios na mesma região.

Neste trabalho de doutorado, a plataforma CMUF foi estruturada de forma a permitir a implementação de sistemas de controle do tipo NCS, com acompanhamento das mensagens enviadas e dos respectivos atrasos de transmissão. Essa plataforma modificada, denominada NCS-CMUF, é utilizada para identificação, classificação e medição dos atrasos nos vários níveis de um sistema de controle por redes e também para o desenvolvimento de estratégias de controle.

Para a realização de testes visando identificar a influência dos atrasos em um NCS e o desempenho de estratégias de controle, a plataforma NCS-CMUF foi configurada em três topologias de redes diferentes: NCS com um nível de rede, denominado NCS Local; NCS com dois níveis de rede, denominado NCS Remoto via Porta Serial e NCS com três níveis de rede, denominado NCS Remoto via Internet:

a) NCS Local - Controlador na Rede CAN

Inicialmente foi implementado um arranjo NCS com controle local, ou seja, com um único nível de rede. O arranjo é formado pela planta, por um nó sensor, por um nó atuador e por um nó controlador. A malha é fechada em uma rede CAN, conforme mostram as Figuras 2.9 e 2.10. Um nó extra (*gateway*) foi adicionado ao sistema para aquisição externa dos dados presentes na rede.

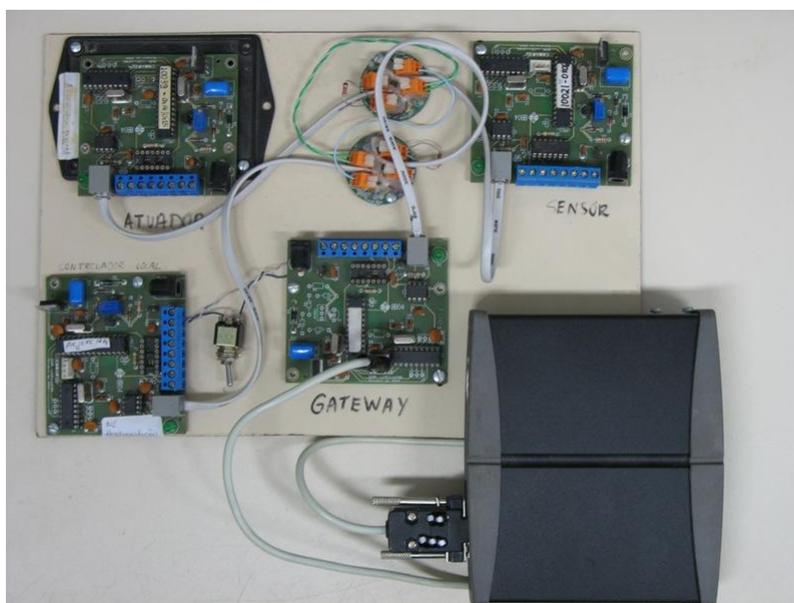


Figura 2.9: Foto da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle local

b) NCS Remoto via Porta Serial - Controlador no *webserver*

Neste arranjo, o NCS possui dois níveis (enlaces) de rede. O primeiro nível, denominado Nível Local, é formado pela planta, por um nó sensor, por um nó atuador e por uma placa *gateway*, conectados por uma rede CAN, este nível é responsável pela aquisição e envio dos valores de saída da planta para o segundo nível do NCS e pela recepção e implementação da ação de controle proveniente, também, do segundo nível do NCS.

O segundo nível, denominado Nível Remoto via Porta Serial, é formado pela interface serial da placa *gateway* e pelo *webserver* interligados por uma rede RS-232. Este nível do

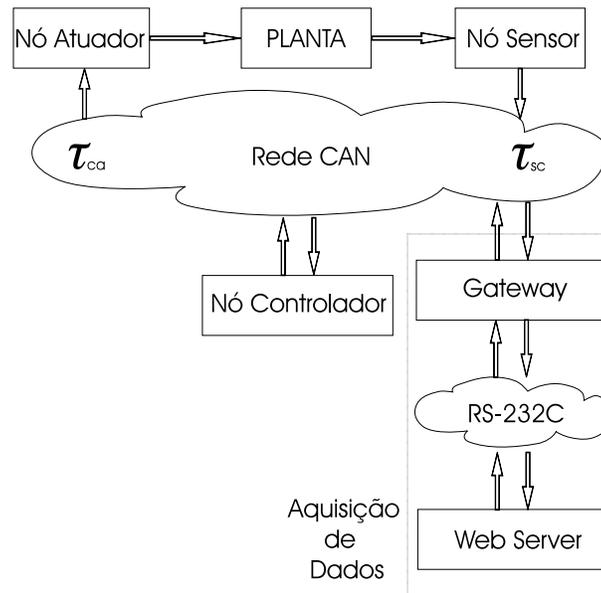


Figura 2.10: Esquema da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle local

NCS é responsável pela recepção dos valores de saída da planta, execução do algoritmo de controle e envio dos valores da ação de controle para a planta (nível 1). As Figuras 2.11 e 2.12, ilustram a arquitetura implementada.

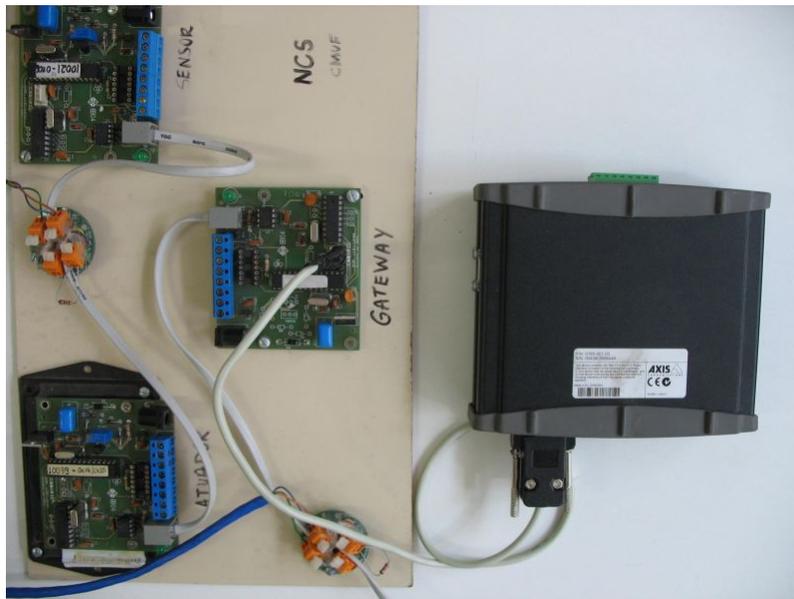


Figura 2.11: Foto da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle via Porta Serial

c) NCS Remoto via Internet - Controlador no PC ligado à Internet por TCP/IP

Nesta configuração, o NCS possui três níveis de rede. Em relação à estrutura de

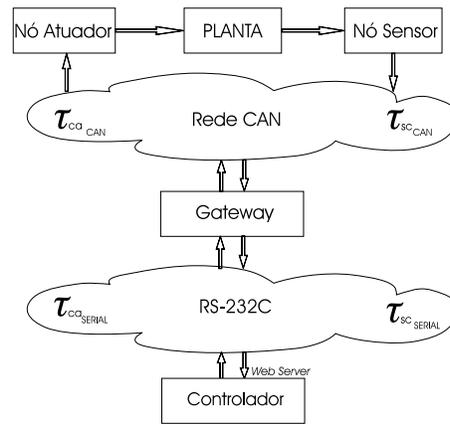


Figura 2.12: Esquema da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle via Porta Serial

NCS Remoto via Porta Serial, o controlador foi deslocado do *webserver* para um outro computador conectado à Internet, o *webserver* passa a desempenhar um papel semelhante ao da placa *gateway*, fazendo a interface entre a rede RS-232 e a Internet. A Figura 2.13, ilustra a arquitetura implementada.

Esta configuração que será utilizada na proposição das técnicas de controle neste trabalho, já que o objetivo é implementar o controlador numa malha de controle na qual a Internet faça parte.

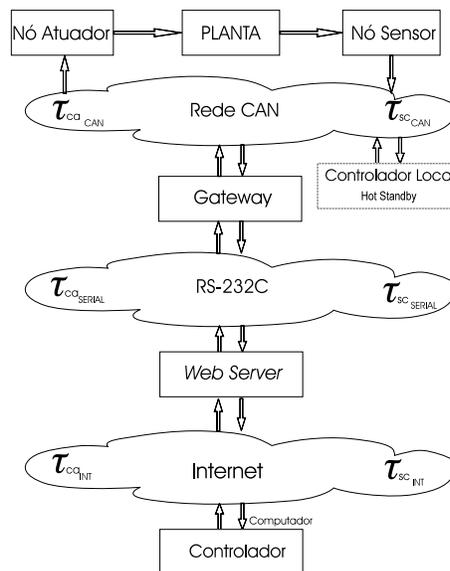


Figura 2.13: Esquema da plataforma piloto de testes NCS-CMUF com controle pela Internet

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as plantas e as plataformas utilizadas para estudos dos atrasos e para proposição das técnicas de controle deste trabalho.

Duas plantas emuladas, constituídas por circuitos RC série, que tem por objetivo emular o comportamento dinâmico de uma variável com características equivalentes a de um sistema de primeira ordem, são utilizadas para o levantamento das características dos atrasos em sistemas de controle via redes. Estas plantas apresentam como vantagens ser de fácil modelagem e apresentar menor interferência a ruídos externos, permitindo uma maior repetibilidade dos testes e uma melhor análise dos dados obtidos.

Um sistema de tanques interativos foi utilizado como planta física para a implementação de uma das técnicas de controle proposta. A malha de vazão entre dois tanques da planta foi a escolhida para a implementação da técnica de controle NCS proposta, em função da reduzida constante de tempo e presença de tempo morto. Uma descrição detalhada desta planta foi apresentada.

Para o estudo mais aprofundado da influência dos atrasos provocados pela rede e para a implementação das técnicas de controle propostas em um sistema de controle via redes foram utilizadas duas plataformas NCS. A plataforma denominada Plataforma Didática, tem por objetivo emular um sistema de controle via redes por meio da utilização de unidades de geração de atrasos (*buffers*) que permitem controlar o tempo entre a transmissão das mensagens, proporcionando um efeito semelhante ao dos atrasos induzidos pela rede.

A outra plataforma, denominada Plataforma NCS-CMUF é um sistema distribuído de arquitetura aberta que permite a implementação de sistemas de controle via redes com acompanhamento do tráfego de mensagens. Na plataforma NCS-CMUF, as mensagens transmitidas possuem carimbos de tempo (*tickstamps*) que permitem a identificação dos instantes de amostragens dos sinais na planta. É um sistema constituído por módulos individuais, com capacidade de processamento interno, interligados por uma rede CAN e que, utilizando um protocolo de aplicação especialmente desenvolvido para as aplicações de controle e monitoração, constitui em uma plataforma NCS ímpar, que permite a implementação de sistemas de controle via redes nas mais variadas formas e configurações.

3 *Projeto dos Controladores e Estimadores para NCSs*

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os projetos para os controladores, estimadores e preditores utilizados para a execução dos testes de levantamento do comportamento dos sistemas em função dos atrasos induzidos pela rede de comunicação e para testes de desempenho de sistemas de controle via redes.

3.2 Controladores PI

Controladores do tipo PI (Proporcional e Integral) são utilizados para testes em malha fechada nas plantas descritas no capítulo anterior (Planta 1, Planta 2 e STI). Para o projeto destes controladores é utilizado o Método da Síntese Direta (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989), a partir da equação geral de modelos de 1ª ordem com tempo morto (eq. (3.1)).

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta_p s}}{\tau s + 1} \quad (3.1)$$

A função de transferência do controlador PI é dado pela eq. (3.2):

$$D(s) = \frac{K_c(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (3.2)$$

com $K_c = \tau/[K(\tau_c + \theta_p)]$ e $T_i = \tau$, em que K_c é o ganho do controlador, τ_c é a constante de tempo da malha fechada e T_i o tempo integral.

3.2.1 Controlador PI em z para Controle da Planta 1

Um controlador PI (eq. (3.2)) foi projetado para controle da Planta 1 (eq. (2.1)) para a caracterização do comportamento do sistema em malha fechada sujeito aos atrasos na rede de comunicação. Este controlador PI tem por objetivo servir de controlador padrão para os testes em malha fechada na Planta 1. Para esse controlador foram considerados os seguintes parâmetros de projeto: $K_c = 6,9$, $\tau_c = \tau/3,4 = 9,6$ e $T_i = 64$ (o tempo integral foi ajustado para aproximadamente $2 \times \tau$ a fim de se obter uma resposta mais lenta em malha fechada para esta planta). A função de transferência do controlador para esses parâmetros é dada por:

$$D_1(s) = \frac{441,6s + 6,9}{64s} \quad (3.3)$$

O controlador descrito em (eq. (3.3)) foi implementado no formato de equação de diferenças utilizando-se a transformada z , com extrapolador de ordem zero (*ZOH*), com um período de amostragem igual a 5 segundos:

$$D_1(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{D_1(s)}{s} \right\} \quad (3.4)$$

sendo $D_1(s)$ dado pela eq. (3.3). Portanto:

$$D_1(z) = \frac{6,90z - 6,36}{z - 1} \quad (3.5)$$

Assim, o sinal de controle $u_1(k)$, a cada amostragem, é dado por:

$$u_1(k) = 6,90e(k) - 6,36e(k-1) + u_1(k-1) \quad (3.6)$$

em que $e(k) = r(k) - y(k)$ e $e(k-1)$ representam o erro atual e o erro no instante de amostragem anterior, respectivamente.

A utilização da discretização do controlador por meio do extrapolador de ordem zero foi aqui adotada exclusivamente com a finalidade de se obter uma equação de diferenças compatível com a equação resultante da transformação Delta, a ser discutida na seção 3.2.3.

3.2.2 Controlador PI em z para Controle da Planta 2

Para o controle da Planta 2 (eq. (2.3)) foi dimensionado um controlador PI (eq. (3.2)) com os seguintes parâmetros de projeto: $K_c = 5$, $\tau_c = \tau/5 = 0,3$ e $T_i = 1,5$. A função de transferência do controlador para estes parâmetros é dada pela eq. (3.7).

$$D_2(s) = \frac{7,5s + 5}{1,5s} \quad (3.7)$$

Este controlador (eq.(3.7)) foi implementado no formato de equação de diferenças utilizando-se transformada z e discretização bilinear (método de Tustin) (PHILLIPS; NAGLE, 1995), com um período de amostragem igual a 150 milissegundos:

$$D_{21}(z) = \frac{5,25z - 4,75}{z - 1} \quad (3.8)$$

Assim, o sinal de controle $u_{21}(k)$, a cada amostragem, é dado por:

$$u_{21}(k) = 5,25e(k) - 4,75e(k-1) + u_{21}(k-1) \quad (3.9)$$

A modificação do protocolo de comunicação na plataforma didática, com a inclusão da informação de *tickstamp* nas mensagens, limitou o período de amostragem em múltiplos e sub-múltiplos de 1 segundo (1, 0.5, 0.25, 0.125 s,...). Em função dessa característica, o mesmo controlador descrito na eq. (3.7) também foi discretizado para um período de amostragem de 125 milissegundos (eq. (3.10)).

$$D_{22}(z) = \frac{5,2083z - 4,7917}{z - 1} \quad (3.10)$$

com o sinal de controle $u_{22}(k)$, a cada amostragem, calculado por:

$$u_{22}(k) = 5,2083e(k) - 4,7917e(k-1) + u_{22}(k-1) \quad (3.11)$$

3.2.3 Controlador PI em Delta para controle da Planta 1

Para sistemas com amostragem irregular, Goodwin e Middleton (GOODWIN; MIDDLETON, 1992) sugerem o emprego de uma discretização de sistemas contínuos em que o intervalo de amostragem passa a ser um parâmetro da equação discreta, sendo os demais parâmetros da equação fixos e independentes do período de amostragem. Essa discre-

tização é baseada na transformada Delta (δ).

Nessa representação, o período de amostragem considerado faz parte do algoritmo de cálculo da ação de controle (PREMARATNE et al., 1994).

Seja o operador diferencial ρ (GOODWIN; GRAEBE; SALGADO, 2000) definido por:

$$\rho \langle f(t) \rangle = \rho f(t) \triangleq \frac{df(t)}{dt} \quad (3.12)$$

$$\rho^n \langle f(t) \rangle = \rho \langle \rho^{n-1} \langle f(t) \rangle \rangle = \frac{df^n(t)}{dt^n} \quad (3.13)$$

Definindo o operador Delta como:

$$\delta(f(\Delta)) = \frac{f(t_2) - f(t_1)}{\Delta}, \quad (3.14)$$

em que $\Delta = t_2 - t_1$ é a diferença de tempo entre duas amostragens consecutivas.

Associando os operadores ρ (eq. (3.12)) e δ (eq. (3.14)), para $\lim t_2 \rightarrow t_1$:

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} [\delta(f(\Delta))] = \rho(f(t)) \quad (3.15)$$

Aplicando eq. (3.15) na equação que representa a função de transferência do controlador PI para a planta 1, dada na eq. (3.3), tem-se:

$$D(\delta) = \frac{441,6\delta + 6,9}{64\delta} \quad (3.16)$$

Substituindo eq. (3.14) em eq. (3.16):

$$64 \left(\frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta} \right) = 441,6 \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta} \right) + 6,9e(k-1) \quad (3.17)$$

Resolvendo eq. (3.17) para $u(k)$ tem-se a equação de controle, dada por:

$$u(k) = 6,9000e(k) - 6,9000e(k-1) + 0,1078\Delta e(k-1) + u(k-1) \quad (3.18)$$

em que Δ é o intervalo de tempo considerado como período de amostragem.

Para atrasos nulos, ou seja $\Delta = h$ (em que h é o intervalo de amostragem) a eq. (3.18) se iguala à eq. (3.6), ou seja, a equação em z (utilizando ZOH) passa a ser um

caso particular da equação em δ (quando o período de amostragem é regular).

3.2.4 Controlador PI com Preditor de Smith para Controle da Planta STI

Em função da presença do tempo morto na planta STI (eq. (2.6)), foi utilizado um controlador PI com compensação de tempo morto com o objetivo de minimizar os efeitos deste atraso na malha fechada. Uma forma clássica de se compensar o tempo morto, melhorando o desempenho e a estabilidade do sistema em malha fechada é por meio do Preditor de Smith (SMITH, 1957), (ASTROM; HANG; LIM, 1994), que utiliza o conhecimento, a priori, do valor do tempo morto para propagar a informação do sensor de forma que o controlador atue com base no erro que seria gerado caso não existisse o tempo morto (MARTINS, 2001).

A Figura 3.1 apresenta o diagrama do controlador PI com Preditor de Smith (PI+PS) e ação “anti-windup”, em que K_p e ω representam os ganhos proporcional e integral (em z), respectivamente. O ganho do preditor (K_s) e o atraso do preditor (z^{-n}) são ajustados em função do ganho e do tempo da morto, respectivamente. O arranjo mostrado na figura conta com a introdução de um esquema “anti-windup” a fim de se evitar saturação do bloco integral.

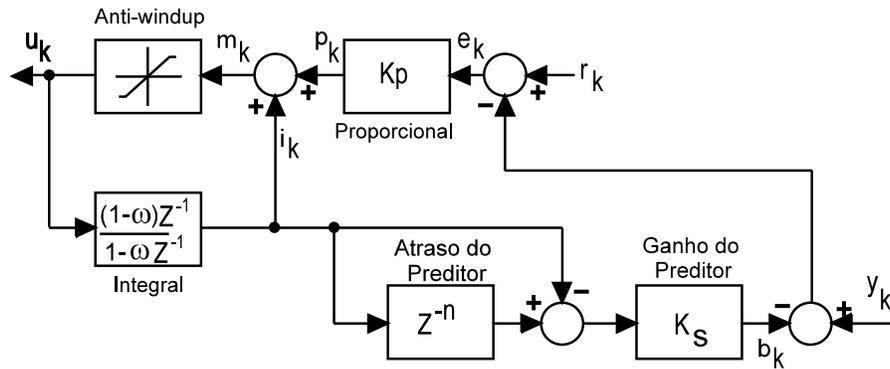


Figura 3.1: Diagrama do Controlador PI com Preditor de Smith com ação “anti-windup” (SHINSKEY, 1988)

Considerando o controlador PI+PS, representado na Figura 3.1, o sinal de controle é obtido pelas eq. (3.19) a (3.22):

$$e(k) = r(k) - y(k-1) + b(k-1) \quad (3.19)$$

$$p(k) = Kp \cdot e(k) \quad (3.20)$$

$$i(k) = u(k-1) - \omega u(k-1) + \omega i(k-1) \quad (3.21)$$

$$b(k) = K_s [i(k-n) - i(k)] \quad (3.22)$$

em que $n = \theta_p/h_R$ e θ_p é o tempo morto da planta.

$$m(k) = p(k) + i(k) \quad (3.23)$$

$$u(k) = m(k) \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} u(k) > u_{max} \text{ então } u(k) = u_{max} \\ u(k) < u_{min} \text{ então } u(k) = u_{min} \end{cases} \quad (3.25)$$

Os valores utilizados para sintonia do controlador no teste estão listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Lista de Valores utilizados na Sintonia do Controlador PI+PS no STI

Parâmetro	Valor
Ganho Proporcional	$Kp = 2,58$
Ganho Integral	$Ti = 1,3 \rightarrow \omega = 0,8925$
Limites da ação Anti-windup	0 a 100%
Ganho do Preditor	$K_s = 0,75$
Atraso do Preditor	$n = 4$

3.3 Estimadores

3.3.1 Estimador de Valores de Saída da Planta, em z

Um estimador baseado no modelo da planta, em z , é utilizado para estimar valores de saída da planta a serem utilizados na ausência da medida real, no instante k . Os valores estimados são utilizados pelo algoritmo de controle para o cálculo do sinal de controle em

cada instante de amostragem. Um modelo ARMAX é usado neste estimador, esse modelo pode ser descrito como:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k) \quad (3.26)$$

em que A , B e C são polinômios baseados no operador de atraso z^{-1} , com as seguintes definições:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na} \\ B(z^{-1}) &= b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \\ C(z^{-1}) &= c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{nc}z^{-nc}, \end{aligned} \quad (3.27)$$

e ξ_k representa o ruído na variável controlada.

Os coeficientes de $C(z^{-1})$ são de difícil estimação e o polinômio pode ser substituído por uma constante para o projeto do filtro. Os parâmetros do modelo ARMAX são obtidos a partir do modelo da planta em Z .

Este estimador considera que a medição dos valores de saída da planta ocorre em intervalos regulares. O estimador de saída da planta calcula o valor \hat{y}_k no instante de amostragem k .

$$\hat{y}_k = -a_1y_{k-1} - a_2y_{k-2} - \dots - a_{na}y_{k-na} + b_1u_{k-1} + b_2u_{k-2} + \dots + b_{nb}u_{k-nb}, \quad (3.28)$$

em que $y_{k-i} = \hat{y}_{k-i}$ é a saída estimada da planta no tempo $(k-i)h$.

No k -ésimo instante de amostragem, tendo recebido o valor medido $k-r$, em que r é o índice da medida, o estimador recalcula os valores estimados de \hat{y}_{k-r+1} até \hat{y}_k , numa operação disparada por evento, num período de tempo inter-amostragens. A equação de atualização, dada por eq. (3.29), possui a vantagem de proporcionar maior confiabilidade e precisão aos valores estimados.

$$\begin{aligned} \hat{y}_{k-r+1} &= -a_1\bar{y}_{k-r} - a_2\bar{y}_{k-r-1} - \dots - a_{na}\bar{y}_{k-r+1-na} + b_1\bar{u}_{k-r} + b_2\bar{u}_{k-r-1} + \dots + b_{nb}\bar{u}_{k-r+1-nb}, \\ \hat{y}_{k-r+2} &= -a_1\hat{y}_{k-r+1} - a_2\bar{y}_{k-r} - \dots - a_{na}\bar{y}_{k-r+2-na} + b_1\hat{u}_{k-r+1} + b_2\bar{u}_{k-r} + \dots + b_{nb}\bar{u}_{k-r+2-nb}, \\ &\vdots \\ \hat{y}_{k-2} &= -a_1\hat{y}_{k-3} - a_2\hat{y}_{k-4} - \dots - a_{na}\bar{y}_{k-2-na} + b_1\hat{u}_{k-3} + b_2\hat{u}_{k-4} + \dots + b_{nb}\bar{u}_{k-2-nb}, \\ \hat{y}_{k-1} &= -a_1\hat{y}_{k-2} - a_2\hat{y}_{k-3} - \dots - a_{na}\bar{y}_{k-1-na} + b_1\hat{u}_{k-2} + b_2\hat{u}_{k-3} + \dots + b_{nb}\bar{u}_{k-1-nb}, \\ \hat{y}_k &= -a_1\hat{y}_{k-1} - a_2\hat{y}_{k-2} - \dots - a_{na}\bar{y}_{k-na} + b_1\hat{u}_{k-1} + b_2\hat{u}_{k-2} + \dots + b_{nb}\bar{u}_{k-nb}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

3.3.2 Estimador de Valores de Saída da Planta, em Delta

Um estimador baseado no modelo atualizado da planta, em Delta, é utilizado para estimar valores de saída do sistema a serem utilizados na ausência da medida real, no instante k .

Os atrasos provocados pela rede são representados em função do número de períodos de amostragem equivalentes. Estes valores são compostos por uma parte inteira (m) e uma parte fracionária (n) do período de amostragem, em que $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ e $0 \leq n < 1$. Desta forma, o estimador é também utilizado com a função de preditor para obtenção de estimação dos valores da saída da planta nos instantes $k + 1, \dots, k + \overline{m_{TCA}}$, ou seja $\hat{y}(k + 1), \dots, \hat{y}(k + \overline{m_{TCA}})$, em que $\overline{m_{TCA}}$ representa o número inteiro de períodos de amostragem presentes no atraso médio $\overline{T_{CA}}$, descrito na eq. (3.32). Estes valores são utilizados pelo algoritmo de controle para o cálculo do sinal de controle em cada instante de amostragem.

Desta forma, o estimador de saída da planta apresenta duas funções: contornar o problema do atraso T_{SC} ao fazer com que uma medida, ainda que estimada, esteja disponível ao controlador no instante de execução do algoritmo de controle e contornar o problema do atraso T_{CA} na medida em que o valor atual estimado para a saída da planta leva em consideração o efeito de atraso de propagação do sinal de controle (ou grande parte dele).

Para a implementação matemática foi utilizado um estimador expresso no formato de equação pseudo-contínua obtida a partir da equação temporal representativa do sistema na qual é aplicada o operador Delta (GOODWIN; MIDDLETON, 1992). Essa implementação representa uma contribuição importante ao propor um estimador que leva em conta o tempo de aplicação de cada sinal de controle à planta. Diferentemente da representação ARMAX, descrita na seção 3.3.1, esta representação pseudo-contínua permite a estimação de valores de saída da planta em instantes intermediários dentro de um intervalo de amostragem. Ao utilizar informações temporais provenientes dos elementos de campo, torna-se possível realizar uma estimação mais precisa. Dessa forma, a implementação dessa representação de estimador só é possível em NCSs que disponibilizam informações sobre os instantes de medição e aplicação dos sinais de controle no sistema, a plataforma NCS-CMUF, por exemplo, possui essa característica.

Seja um sistema linear a tempo contínuo representado pela eq. (3.30):

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = \quad (3.30)$$

$$b_{n-1} \frac{d^{n-1}u(t - \theta_p - T_{CA}(k - n - 2))}{dt^{n-1}} + \dots + b_0 u(t - \theta_p - T_{CA}(k - 1)),$$

em que θ_p é o tempo morto da planta (considerado constante) e $T_{CA}(k)$ é o atraso de tempo entre controlador e atuador na amostragem k , em que $k = \text{floor}(t/h)$. Os valores utilizados para $T_{CA}(k - n - 2) \dots T_{CA}(k - 1)$ seguem a seguinte regra:

$$T_{CA}(k-p) = \begin{cases} T_{CA}(k-p) \text{ é o atraso medido} \\ \overline{T_{CA}(k-p)} \text{ é o atraso estimado (médio), se } T_{CA}(k-p) \text{ está indisponível,} \end{cases} \quad (3.31)$$

em que p representa o número de amostras anteriores consideradas no cálculo em questão, $T_{CA}(k-p)$ é o valor do atraso T_{CA} no instante $(k-p)$. Este valor é medido e é obtido a partir da chegada do sinal de *Ack* relativo ao sinal de controle $u(k-p)$ que contém o tickstamp do momento da aplicação do referido sinal. $\overline{T_{CA}(k-p)}$ representa o valor médio do atraso até o instante $(k-p)$ e é dado pela média móvel dos valores anteriores de T_{CA} , conforme mostra a eq. (3.32).

Seja o atraso médio $\overline{T_{CA}(k)}$ de em um NCS, obtido por meio da média móvel dos atrasos T_{CA} presentes no sistema, definido pela eq. (3.32):

$$\overline{T_{CA}(k)} = (1 - \psi)\overline{T_{CA}(k-1)} + \psi T_{CA}(k), \quad (3.32)$$

em que $\psi = 2/nm - 1$ representa o fator de suavização exponencial para nm valores medidos.

O atraso T_{CA} é composto pelas parcelas $m_{TCA}h$ e $n_{TCA}h$ $\therefore T_{CA} = h(m_{TCA} + n_{TCA})$, em que $m_{TCA} = 0, 1, 2, 3, \dots$ representa o número inteiro de períodos de amostragem e $0 \leq n_{TCA} < 1$ representa a parte fracionária de um período de amostragem presentes neste atraso. O cálculo de $\overline{T_{CA}(k)}$ é uma operação disparada pelo evento *CHEGOU_ACK*, uma vez que a mensagem de *Ack* da ação de controle possui o tickstamp correspondente ao instante da aplicação da ação de controle $u(k)$ o que possibilita o cálculo de $T_{CA}(k)$. É mostrado nas Figuras 3.2 e 3.3, o comportamento do atraso T_{CA} medido ao longo de dois experimentos. As Figuras também mostram o perfil do atraso T_{CA} médio durante os mesmos períodos. Pode-se observar o caráter aleatório do atraso instantâneo e, ao mesmo tempo, a validade de se utilizar o valor médio a partir de uma média móvel para representação e projeção deste atraso. No trabalho de Wang, Xu e Wang (WANG; XU; WANG, 2005), por exemplo, utilizou-se como informação para o atraso seguinte o valor atual do atraso, considerando que existe uma grande probabilidade do valor do atraso

seguinte ser igual ao valor atual (*self-similar*). Esta consideração não foi confirmada nos testes realizados e a utilização do atraso médio apresentou resultados bem satisfatórios e pareceu ser a melhor escolha.

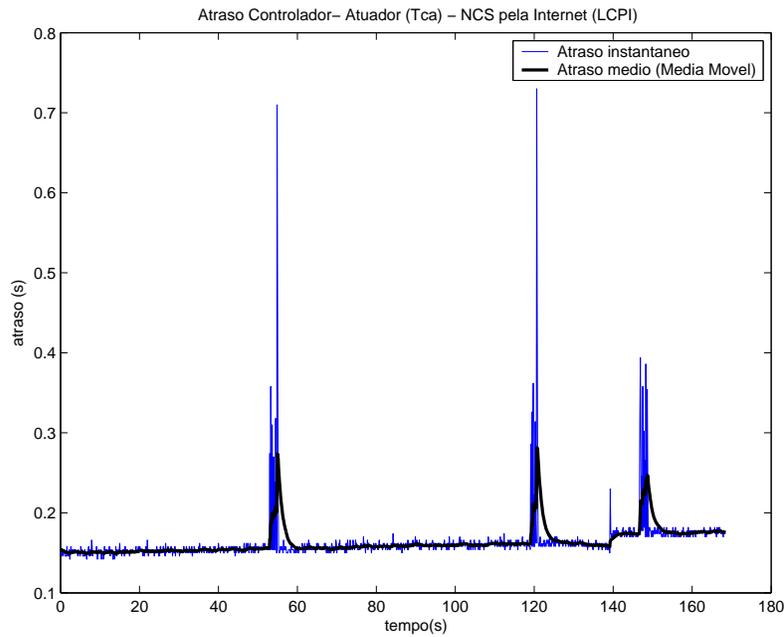


Figura 3.2: Exemplo 1: variação do atraso T_{CA} e de sua média móvel

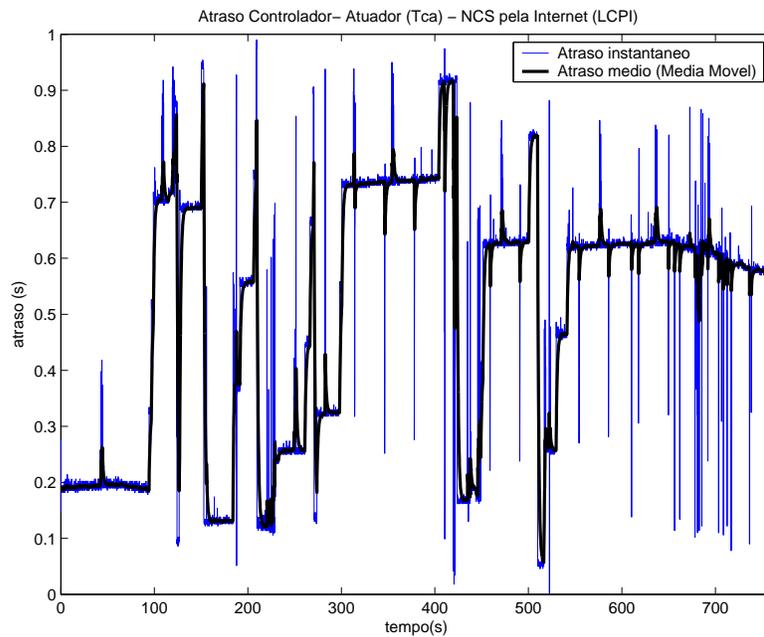


Figura 3.3: Exemplo 2: variação do atraso T_{CA} e de sua média móvel

Aplicando a aproximação da eq. (3.12) na eq. (3.30), tem-se:

$$\rho^n y(t) + a_{n-1} \rho^{n-1} y(t) + \dots + a_0 y(t) = b_{n-1} \rho^{n-1} u(t - \theta_p - T_{CA_{n-1}}) + \dots + b_0 u(t - \theta_p - T_{CA_0}) \quad (3.33)$$

em que $T_{CA_{n-1}}, \dots, T_{CA_0}$ representam os atrasos entre controlador e atuador para os respectivos sinais de controle.

Como o sistema fica submetido a sinais de controle com intervalos de aplicação irregulares, a discretização do sistema contínuo será feita por meio da transformada Delta (δ), obtendo-se a equação pseudo-contínua do sistema, na qual o tempo de aplicação da ação de controle (representado por Δ) faz parte do algoritmo de cálculo da saída da planta.

Substituindo a aproximação da eq. (3.15) na eq. (3.33) tem-se a equação pseudo-contínua que representa o estimador para saídas da planta:

$$\delta^n y(\Delta) + a_{n-1} \delta^{n-1} y(\Delta) + \dots + a_0 y(\Delta) = b_{n-1} \delta^{n-1} u(\Delta - n\theta_p - T_{CA_{n-1}}) + \dots + b_0 u(\Delta - n\theta_p - T_{CA_0}) \quad (3.34)$$

e que $n\theta_p = \theta_p/h$.

Os coeficientes da equação pseudo-contínua do estimador podem ser considerados constantes ou variáveis, nesse último caso obtidos a partir de algum algoritmo estimador de parâmetros da planta.

Em função da existência do atraso T_{CA} , gerado pela rede, foi incorporado ao estimador a funcionalidade de preditor, que relaciona a ação de controle $u(k)$ com a saída da planta $y(k + m_{TCA})$, ou seja, para o cálculo da ação de controle $u(k)$ são utilizadas previsões m_{TCA} passos à frente, de forma que o cálculo da ação de controle possa levar em conta os efeitos futuros dos atrasos. Desta forma, o estimador em Delta pode ser caracterizado como uma estrutura preditiva e adaptativa que permite a estimação com horizonte variável (em função do atraso T_{CA}).

A Figura 3.4 ilustra o comportamento das funções de previsão e adaptação do estimador, na qual a ação de controle $u(k)$ será calculada em função do valor $\hat{y}(k + 2)$, para $m_{TCA} = 2$.

Para a previsão dos valores $y(k), \dots, y(k + m_{TCA})$ são considerados os efeitos das ações de controle levando-se em conta o tempo de efetiva aplicação de cada uma delas. Na Figura 3.4, por exemplo, durante o intervalo de amostragem compreendido entre os valores $y(k+2)$ e $y(k+3)$ será considerada a influência de $u(k-1)$ durante o intervalo de 0 a

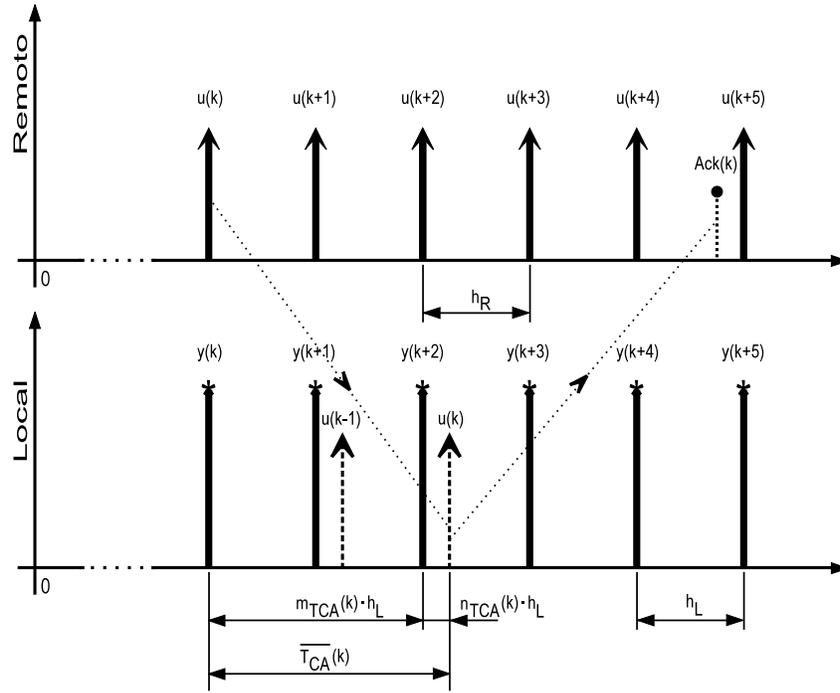


Figura 3.4: Correlação temporal entre os sinais $u(k)$ e $y(k)$ em um NCS

$n_{TCA}(k)h$ somada à influência de $u(k)$ durante o intervalo de $n_{TCA}(k)$ a $h - n_{TCA}(k)$. Desta forma, a equação do estimador (eq. 3.34) é implementada em duas etapas: uma etapa intermediária para a estimação da saída sob o efeito de $u(k - 2 - n\theta_p - \overline{m_{TCA}})$, denominada $\hat{y}_{INT}(k)$ e uma etapa final, considerada a partir do valor intermediário anteriormente calculado, com a contribuição de $u(k - 1 - n\theta_p - \overline{m_{TCA}})$, que finalmente determina o valor de $\hat{y}(k)$.

Atualização das Predições para os Valores de Saída da Planta

Ao receber uma nova medida, $\bar{y}(k - p)$, o estimador atualiza os valores previstos para as saídas nos intervalos $(k - p + 1), \dots, (k - p + \overline{m_{TCA}})$, que são $\hat{y}(k - p + 1), \dots, \hat{y}(k - p + \overline{m_{TCA}})$, ou seja, a equação de estimação de valores de saída da planta é executada recursivamente $\overline{m_{TCA}}$ passos à frente. Nos cálculos de re-estimação sempre são utilizados os valores atualizados de $y(k), y(k - 1), \dots, \bar{u}(k), \bar{u}(k - 1), \dots, T_{CA}(k), T_{CA}(k - 1), \dots$ e de $\overline{T_{CA}(k)}$. Esta atualização faz com que todas informações possíveis estejam incorporadas no estimador para propiciar melhores estimações e predições.

3.3.3 Estimador on-line dos Parâmetros da Planta

Considerando que o sistema a ser controlado é do tipo linear e invariante no tempo, para uma condição operacional selecionada, e que a estrutura do modelo da planta é conhecida a priori, é proposto um estimador de parâmetros, on-line, para determinação dos coeficientes do modelo da planta. O método de estimação escolhido utiliza a técnica de mínimos quadrados recursivos, com fator de esquecimento e garantia de estabilidade numérica por meio da fatoração U-D (BIERMAN, 1977), (BIERMAN; THORNTON, 1977) e trabalha com o sistema na malha fechada (MARTINS; JOTA, 2009b).

Seja um sistema linear representado por sua equação discreta equivalente (eq. (3.35)). A sequência recursiva do estimador de parâmetros por mínimos quadrados com fator de esquecimento, para este tipo de sistema, é apresentado nas eq. (3.36) a (3.38).

$$y(k) + \alpha_1 y(k-1) + \dots + \alpha_{n\alpha} y(k-n\alpha) = \beta_1 u(k-1) + \dots + \beta_{n\beta} u(k-n\beta) + e(k) \quad (3.35)$$

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k-1) (y(k) - \varphi^T(k)\theta(k-1)) \quad (3.36)$$

$$K(k-1) = P(k-1)\varphi(k) (\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k))^{-1} \quad (3.37)$$

$$P(k) = (I - K(k-1)\varphi^T(k)) P(k-1)/\lambda \quad (3.38)$$

em que:

- $\theta(k) = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \dots & \theta_n \end{bmatrix}^T$ é a matriz de parâmetros.
- $\mathbf{K}(k) = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & \dots & K_n \end{bmatrix}^T$ é a matriz do filtro de Kalman.
- $y(k)$ é o valor de saída da planta no instante k.
- $\varphi(k) = \begin{bmatrix} y(k-1) & y(k-2) & \dots & y(k-n\alpha) & u(k-1) & u(k-2) & \dots & u(k-n\beta) \end{bmatrix}$ é a matriz de regressores.

$$\bullet \mathbf{P}(k) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & \ddots & & \\ \vdots & & & \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \text{ é a matriz de covariância.}$$

- \mathbf{I} é uma matriz identidade.
- λ é o fator de esquecimento.

O algoritmo desenvolvido foi baseado no algoritmo recursivo apresentado por Astrom e Wittenmark (ASTROM; WITTENMARK, 1997) e possui como inovação a utilização de informações sobre os instantes de medição e aplicação dos sinais de controle na planta. Neste trabalho, o estimador de parâmetros da planta foi implementado na Plataforma NCS-CMUF (seção 2.3.2), que permite a inclusão dos carimbos de tempo (tickstamps) nas mensagens enviadas juntamente com os valores das medições e dos sinais de controle aplicados. Os valores atualizados dos parâmetros estimados podem ser utilizados no modelo da planta para a etapa de estimação de valores da saída da planta, descritos anteriormente. O intervalo analisado para fins de estimação de parâmetros, ou seja, para atualização da matriz de regressores, é o intervalo anterior ao da medida recém recebida pelo controlador. No exemplo da Figura 3.5, a chegada da medida $y(k-8)$ dispara o evento de estimação dos parâmetros da planta e o intervalo analisado é o compreendido entre as medidas $y(k-10)$ e $y(k-9)$.

Montagem da Matriz de regressores $\varphi(k)$

A matriz de regressores, $\varphi(k)$, composta por valores anteriores para a saída da planta ($y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n\alpha)$) e de sinais de controle ($u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n\beta)$) é montada de forma recursiva, dentro do programa estimador de parâmetros, a partir do evento de disparo *CHEGOU_MEDIDA*. Os valores $y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n\alpha)$ são os valores medidos para a saída da planta. Os valores de $u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n\beta)$ são obtidos por meio de um algoritmo que calcula o valor médio da ação de controle aplicado durante cada período de amostragem. Esse cálculo é realizado com os valores nominais das ações de controle calculadas e enviadas à planta e com os seus respectivos carimbos de tempo obtidos a partir da mensagem de *Ack* referente a cada ação de controle. Considerando que a planta controlada possui a mesma dinâmica para variações positivas e negativas na ação de controle, o valor médio da ação de controle representa a ação de controle equivalente que provocaria a mesma variação na saída da planta dentro do período de amostragem analisado. O cálculo da ação de controle média é dada pela soma

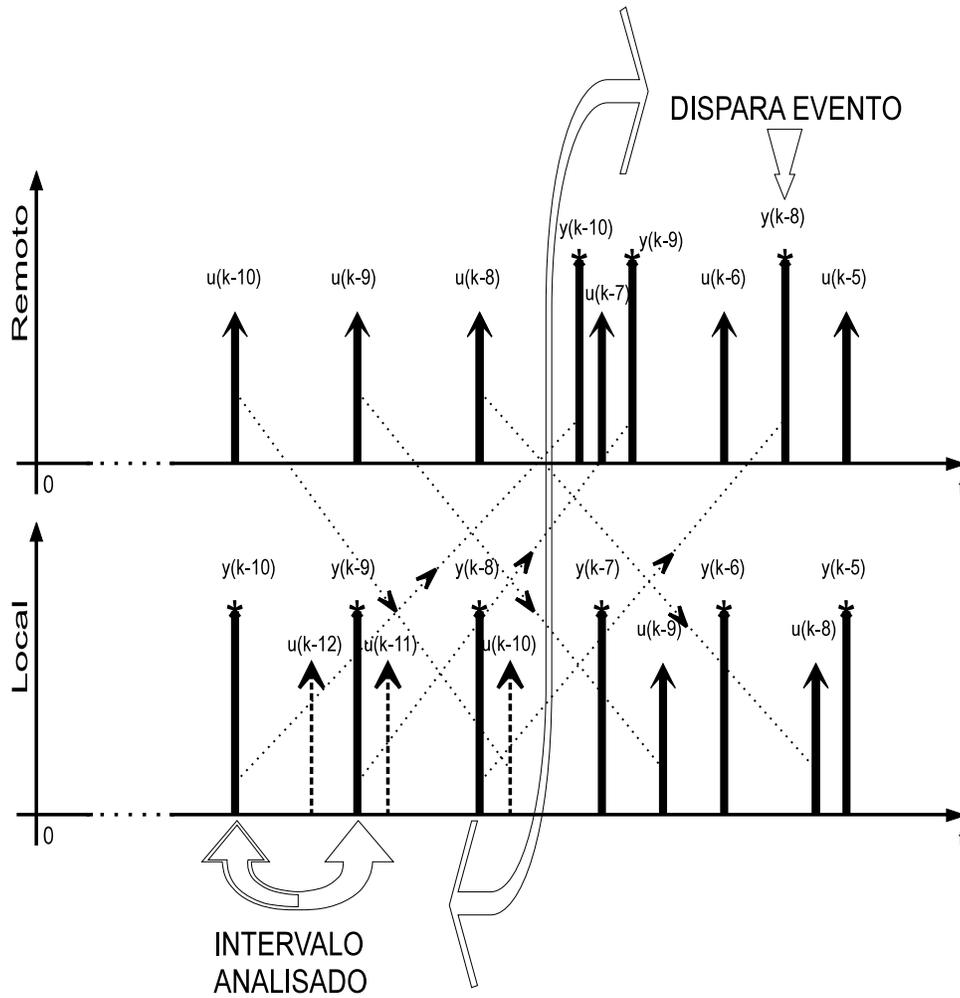


Figura 3.5: Intervalo considerado para execução do algoritmo de mínimos quadrados

ponderada das ações de controle presentes no intervalo avaliado.

A Figura 3.6 mostra um exemplo de sequência de sinais de entrada e saída na planta em um NCS. As eq. (3.39) a (3.41) mostram a metodologia utilizada para o cálculo da ação de controle média em três intervalos: $\bar{u}(13)$ para o intervalo $ty(12)$ a $ty(13)$, $\bar{u}(14)$ para o intervalo $ty(13)$ a $ty(14)$ e $\bar{u}(15)$ para o intervalo $ty(14)$ a $ty(15)$, na situação exemplo mostrada pela figura em questão.

$$\bar{u}(13) = \frac{1}{h} \left\{ \int_{ty(12)}^{tu(11)} u(10)dt + \int_{tu(11)}^{ty(13)} u(11)dt \right\} \quad (3.39)$$

$$\bar{u}(14) = \frac{1}{h} \left\{ \int_{ty(13)}^{tu(12)} u(11)dt + \int_{tu(12)}^{tu(13)} u(12)dt + \int_{tu(13)}^{ty(14)} u(13)dt \right\} \quad (3.40)$$

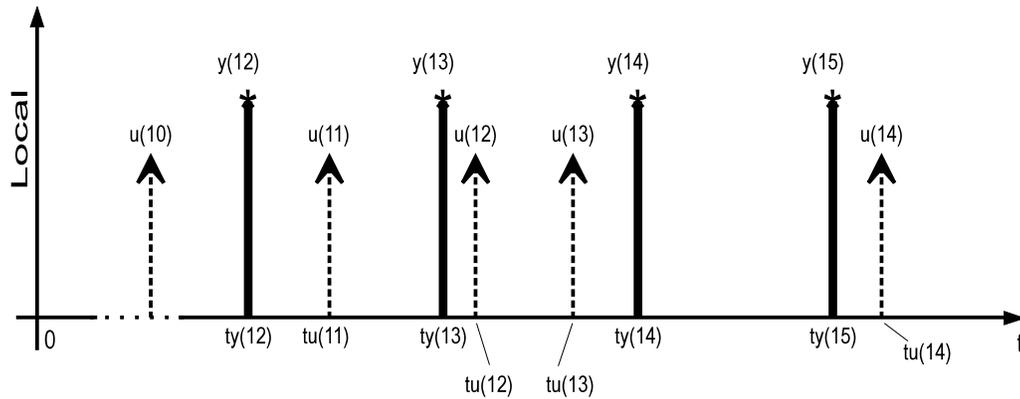


Figura 3.6: Exemplo de seqüência de sinais na planta - cálculo da ação de controle média

$$\bar{u}(15) = \frac{1}{h} \left\{ \int_{ty(14)}^{ty(15)} u(13) dt \right\} = u(13) \quad (3.41)$$

3.4 Perda de Pacotes na Plataforma NCS-CMUF

Uma questão importante a ser considerada em relação aos NCSs é a possibilidade do sistema perder mensagens na rede. Estas perdas podem ocorrer em função da 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. Este problema é uma fonte em potencial de instabilidade e de degradação do desempenho do sistema em malha fechada. Para lidar com este problema várias metodologias são propostas na literatura científica, dentre elas destacam-se as de Yu et al. (YU et al., 2004) e a de Tian e Levy (TIAN; LEVY, 2008).

Os problemas de perda de pacotes e suas respectivas soluções são considerados sob aspectos diferentes neste trabalho e são classificados em duas categorias: perda de medidas e perda do sinal de controle. Para a questão da perda de medidas provenientes do sensor é utilizada a técnica de estimação do valor perdido a ser usado em substituição ao valor ausente. Na plataforma NCS-CMUF, a composição do vetor de medidas reais (um vetor de 256 posições) é feita progressivamente nos instantes em que novas medidas vão sendo recebidas pela estação remota. Como estas medidas possuem um número serial, adicionado pelo nó sensor no instante da medida, o algoritmo de controle simplesmente as posiciona no vetor de medidas reais. Nos casos em que o número serial da medida possui índice maior ou igual a dois é caracterizada a perda de medida. Neste momento o algoritmo de controle colocará no vetor de medidas reais a estimação mais recente referente

à medida perdida. Se a medida estiver simplesmente atrasada e chegar à estação remota em amostragens seguintes, caracterizando uma perda temporária da medida, o valor real sobrescreverá o valor estimado referente.

Para analisar a perda de pacotes referentes ao sinal de controle é preciso que sejam consideradas duas hipóteses: 1) o sinal de controle $u(k)$ efetivamente não chegou ao nó atuador, ou seja, uma mensagem *ENVIA_AC* se perdeu no caminho entre o controlador e o nó atuador, desta forma o sinal $u(k-1)$ será mantido no atuador até a recepção de $u(k+1)$; 2) o sinal de controle $u(k)$ chegou ao nó atuador, foi criada uma mensagem de confirmação (*Ack*) referente ao sinal de controle mas, a mensagem de confirmação se perdeu no caminho entre o nó atuador e o controlador, ou seja o sinal de controle $u(k)$ foi aplicado à planta mas não se conhece o instante de aplicação, apenas que $t_{u(k-1)} < t_{u(k)} < t_{u(k+1)}$, teoricamente. A chegada da mensagem de confirmação é que valida a implementação do referente sinal de controle e em ambas situações descritas anteriormente não há esta confirmação, o que caracterizaria perda de pacote de sinal de controle, porém apenas a primeira situação é, de fato, uma perda de sinal de controle.

Um módulo para análise de perda de sinal de controle pode ser utilizado para tentar identificar se o sinal de controle enviado chegou ou não ao nó atuador. Em caso afirmativo, o módulo valida o sinal de controle sem *Ack* e estima o instante de sua aplicação. Em caso negativo será considerada a perda do sinal de controle e a manutenção do sinal de controle anterior.

A formulação matemática do módulo de perda de pacote de sinal de controle para um sistema de primeira ordem, considerando a perda da mensagem da confirmação do sinal $u(k-1-\overline{m_{TCA}})$ mostrada na Figura 3.7 é apresentada. O termo $\overline{m_{TCA}}$ representa o número inteiro de períodos de amostragem presentes no atraso médio $\overline{T_{CA}}$. No exemplo mostrado na figura foi considerado que o sinal medido $y(k)$ sofreu influência de outro sinal de controle além de $u(k-2-\overline{m_{TCA}})$. Embora a faixa temporal para a possível localização de $u(k-1-\overline{m_{TCA}})$, $t_{u(k-1-\overline{m_{TCA}})}$, seja o intervalo T2, o algoritmo restringe, por simplificação, o cálculo do instante de aplicação do sinal de controle ao intervalo compreendido entre as duas medições utilizadas como parâmetro; este intervalo é representado por T1.

Sejam as equações pseudo-contínuas que representam o estimador dos valores de saída de uma planta de primeira ordem, representadas pelas eq. (3.42) e (3.43). Essas equações têm a mesma estrutura das equações utilizadas no estimador de saída da planta, expressa em (eq. 3.34).

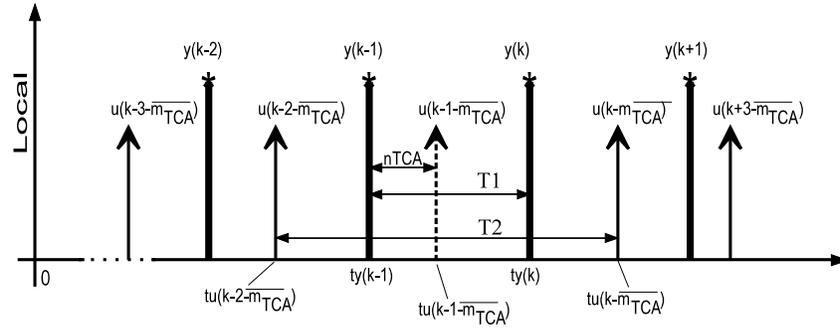


Figura 3.7: Exemplo de uma situação de perda de sinal de controle

$$y_{INT}(k) = \left(1 - \frac{n_{TCA}}{\tau}\right) y(k-1) + K \frac{n_{TCA}}{\tau} u(k-2 - \overline{m_{TCA}}) \quad (3.42)$$

$$y(k) = \left(1 - \frac{h - n_{TCA}}{\tau}\right) y_{INT}(k) + K \frac{h - n_{TCA}}{\tau} u(k-1 - \overline{m_{TCA}}) \quad (3.43)$$

em que τ e K representam a constante de tempo e ganho da planta, respectivamente. O valor $y_{INT}(k)$ representa o valor da saída no instante da aplicação do sinal de controle $u(k-1 - \overline{m_{TCA}})$. O instante de aplicação do sinal de controle $u(k-1 - \overline{m_{TCA}})$ a ser estimado é representado por n_{TCA} .

Substituindo $y_{INT}(k)$ em eq. (3.43) por eq. (3.42) e resolvendo para n_{TCA} , tem-se:

$$\begin{aligned} n_{TCA} = & \frac{1}{2(Ku(k-2 - \overline{m_{TCA}}) - y(k-1))} K\tau u(k-1 - \overline{m_{TCA}}) \\ & + K\tau u(k-2 - \overline{m_{TCA}}) - 2\tau y(k-1) \\ & + \tau \sqrt{K^2 u(k-1 - \overline{m_{TCA}})^2 + 2K^2 u(k-1 - \overline{m_{TCA}}) u(k-2 - \overline{m_{TCA}})} \\ & + K^2 u(k-2 - \overline{m_{TCA}})^2 - 4Ku(k-1 - \overline{m_{TCA}}) y(k-1)} \\ & - 4Ku(k-2 - \overline{m_{TCA}}) y(k) + 4y(k-1) y(k) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Caso o valor calculado n_{TCA} seja válido, ou seja $0 \leq n_{TCA} < h$, este valor passa a representar, então, o instante de aplicação do sinal de controle que era considerado perdido.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram descritas as representações matemáticas dos controladores, estimadores e preditores utilizados para testes e para a formulação das estratégias de controles a serem propostas.

Foi feita a descrição matemática dos controladores PI, expressos em z e em Delta, e do controlador PI com Preditor de Smith. Estes controladores foram projetados pelo Método da Síntese Direta e são utilizados para o controle das plantas descritas no capítulo anterior.

Também foram apresentadas as formulações matemáticas dos estimadores de variáveis de saída, em z e em Delta. Estes estimadores tem por finalidade fornecer valores estimados da saída da planta para o controlador na ausência da medida real. Um estimador de parâmetros da planta, baseado na técnica de mínimos quadrados recursivos, com fator de esquecimento e garantia de estabilidade numérica por meio da fatoração U-D, foi também desenvolvido e apresentado.

Um módulo para identificação de perdas de pacotes em NCSs também foi apresentado. Este módulo tem por objetivo avaliar a perda de pacotes no envio de sinais de controle.

4 *Estratégias de Controle Propostas*

4.1 Introdução

Em uma aplicação real, na qual as unidades sensora, controladora e atuadora estão sincronizadas entre si e o tempo de atraso T_{SC} é diferente de zero, o controlador nunca terá a informação sobre o valor presente, medido pela unidade sensora, quando da execução do algoritmo de controle; na melhor das hipóteses terá o valor da medição no instante de amostragem anterior. A ocorrência do atraso T_{CA} faz com que a ação de controle calculada pelo controlador não seja efetivamente realizada no atuador (no intervalo de amostragem correto). Várias configurações foram e ainda continuam sendo propostas pela comunidade científica, visando minimizar a influência da rede na qualidade da resposta do sistema em malha fechada e tentar aproximar, ao máximo, os NCS dos sistemas digitais convencionais.

A utilização de Sistemas de Controle via Redes permite a distribuição do processamento e possibilita o controle de processos e sistemas de forma remota. A justificativa para isso é que, ao controlar remotamente, via rede, processos situados em locais diversos é possível a concentração e/ou a distribuição de esforços na elaboração de algoritmos e na sintonia destes controladores, que podem ser implementados em qualquer local atendido pela rede em questão (YANG; CHEN; ALTY, 2003). Em um NCS, do qual a Internet faz parte, o algoritmo de controle poderia estar, em tese, em qualquer computador conectado à rede mundial de computadores. Esta possibilidade cria opções muito interessantes como, por exemplo, a instalação de centros de excelência em controle onde poderia ser a feita a concentração de controladores por complexidade, tipo, etc. e a criação de laboratórios de controle remotos, onde processos físicos poderiam ser estudados e testados remotamente a partir de um computador em um laboratório ou em uma sala de aula. As duas propostas para sistemas de controle via redes são apresentadas nas seções 4.2 e 4.3.

ainda apresenta os blocos utilizados como compensador do sinal de controle, estimador e controlador, utilizados na estratégia de controle.

Para a representação dos sinais atrasados foi adotada uma notação especial na qual os valores dos atrasos são dados em função do número de períodos de amostragem equivalentes. Estes valores são compostos por uma parte inteira (m) e uma parte fracionária (n) do período de amostragem, em que $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ e $0 \leq n < 1$. De acordo com esta notação, $T_{CA} = (m_{TCA} + n_{TCA})h$ e $T_{SC} = (m_{TSC} + n_{TSC})h$. A figura 4.2 apresenta um exemplo da representação para o atraso T_{CA} , com $m_{TCA} = 2$ e $n_{TCA} = 0.2$, tal que $T_{CA} = 2.2h$. Neste caso, o sinal de controle $u(k)$, enviado pelo nó controlador no k_{esimo} instante de amostragem, será recebido pelo nó atuador no instante $kh + T_{CA} = (k + m_{TCA} + n_{TCA})h$ que é denominado $u_{k+m_{TCA}+n_{TCA}}$.

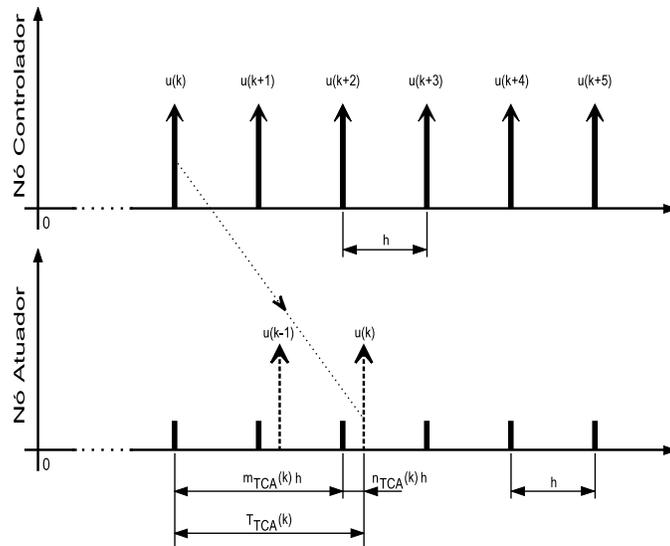


Figura 4.2: Exemplo da representação dos atrasos

4.2.1 Estimador de valores de saída da planta

Para a estimação dos valores de saída da planta a serem utilizados na ausência da medida real, no instante k , é utilizado o estimador em z apresentado na seção 3.3.1.

Seja a equação do estimador, dada pela eq. (3.28). Para o cálculo do valor estimado para a saída da planta, são consideradas duas regras para a seleção dos valores de $y(k)$ e $u(k)$, conforme mostram as eq. (4.1) e (4.2).

$$y_{k-i} = \begin{cases} \bar{y}_{k-i}, & \text{quando } m_{TSC} = 0 \text{ e } n_{TSC} = 0, \text{ ou} \\ \hat{y}_{k-i} & \text{se } \bar{y}_{k-i} \text{ não está disponível em } t = (k - i), \end{cases} \quad (4.1)$$

$$u_{k-i} = \begin{cases} \bar{u}_{k-i} & \text{se } T_{CA} < h \text{ (} m_{TCA} = 0 \text{ e } 0 \leq n_{TCA} < 1\text{)}, \\ \hat{u}_{c_{k-i}} & \text{se } \bar{u}_{k-i} \text{ está indisponível em } t = (k-i), \end{cases} \quad (4.2)$$

em que \bar{y}_{k-i} e \hat{y}_{k-i} correspondem, respectivamente, ao valor medido e ao valor estimado para a saída da planta no $(k-i)_{esimo}$ intervalo de amostragem. \bar{u}_{k-i} e $\hat{u}_{c_{k-i}}$ são o valor do sinal de controle equivalente e o sinal de controle compensado enviado à planta no $(k-i)_{esimo}$ intervalo de amostragem, respectivamente, conforme será mostrado na seção 4.2.3 (ver eq. (4.8)).

4.2.2 Cálculo do sinal de controle

Os valores estimados para a saída da planta são utilizados pelo algoritmo de controle como se fossem os valores da saída da planta. Particularmente, o valor \hat{y}_k é utilizado como se fosse o valor atual da saída da planta. O cálculo do sinal de controle é uma função disparada por tempo a cada instante de amostragem. Para um controlador geral, representado por um compensador em z^{-1} , a equação de diferenças para o sinal de controle é dado pela eq. (4.3).

$$\hat{u}_k = f(u, e) = \alpha c_1 e_k + \alpha c_2 e_{k-1} + \dots + \alpha c_{n\alpha c} e_{k-n\alpha c+1} + \beta c_1 u_{k-1} + \beta c_2 u_{k-2} + \dots + \beta c_{n\beta c} u_{k-n\beta c}, \quad (4.3)$$

em que αc e βc são os parâmetros do controlador, e_k é o erro atual da saída da planta, dado por $r_k - y_k$ e e_{k-i} é o erro da planta e_k , i passos atrás. Os valores u_{k-i} são os valores de sinais de controle i passos atrás, conforme é mostrado na eq. (4.4).

$$u_{k-i} = \begin{cases} \bar{u}_{k-i} & \text{se } \bar{y}_{k-i+1} \text{ está disponível em } t = kh, \\ \hat{u}_{c_{k-i}} & \text{se } \bar{y}_{k-i+1} \text{ não está disponível em } t = kh, \end{cases} \quad (4.4)$$

em que \bar{u}_{k-i} é o sinal de controle equivalente aplicado à planta no $(k-i)$ -ésimo instante de amostragem e $\hat{u}_{c_{k-i}}$ é o sinal de controle compensado enviado à planta no $(k-i)$ -ésimo instante de amostragem, como mostrado na seção seguinte (ver eq. (4.8)).

4.2.3 Compensação do sinal de controle

Quando o controlador recebe um novo valor de medida da saída da planta (medida $k-i$), uma sequência de operações é desencadeada com o objetivo de atualizar as variáveis internas \bar{y}_{k-i} e \hat{y}_{k-i+1} a \hat{y}_k , melhorar a qualidade do estimador e compensar as deficiências

na implementação da ação de controle, decorrentes da presença do atraso T_{CA} . A partir do valor recebido da medida da saída da planta e do modelo ARMAX usado no estimador, o sinal de controle efetivamente aplicado à planta no intervalo $k - i - 1$, denominado sinal de controle equivalente, é estimado da seguinte forma:

$$\bar{u}_{k-i-1} = \frac{\bar{y}_{k-i} + a_1\bar{y}_{k-i-1} + a_2\bar{y}_{k-i-2} + \dots + a_{na}\bar{y}_{k-i-na} - b_2\bar{u}_{k-i-2} + \dots + b_{nb}\bar{u}_{k-i-nb}}{b_1} \quad (4.5)$$

Em função da diferença entre o instante de cálculo e o instante de implementação da ação de controle, o valor do sinal de controle efetivamente realizado pelo atuador difere do valor calculado e enviado a este elemento. A diferença entre estes dois valores, chamado de *déficit do sinal de controle*, ud , é calculado pela eq. (4.6):

$$ud_{k-i-1} = \hat{u}_{k-i-1} - \bar{u}_{k-i-1} \quad (4.6)$$

A idéia chave desta proposta é utilizar o valor do déficit anteriormente calculado (eq. (4.6)), ou parte desse valor, para uma compensação extra visando reduzir a deficiência da implementação dos sinais de controle aplicados em amostragens anteriores. Um filtro de primeira ordem é utilizado para controlar a dinâmica com a qual o sinal de compensação será introduzido na malha fechada.

O cálculo do déficit do sinal de controle é disparado por evento, sempre que uma medida é recebida pelo controlador. Dentro de um período de amostragem, o déficit pode ser calculado mais de uma vez, desde que o controlador receba duas ou mais medidas neste intervalo. Neste caso, os valores são somados e transferidos no próximo instante de amostragem. O valor resultante, chamado déficit do sinal de controle acumulado (ACC_{ud}), é calculado conforme mostra a eq. (4.7).

$$ACC_{ud} = \sum_{j=0}^{nm} \gamma ACC_{ud} + k_f(1 - \gamma)ud_{k-j-1}, \quad (4.7)$$

em que ud_{k-j-1} é o déficit do sinal de controle calculado a partir da chegada da medida \bar{y}_{k-j} , nm é o número de medidas que chegam ao controle durante o intervalo de amostragem considerado, k_f é o ganho do filtro e γ é a constante de tempo do filtro usado para o controle da dinâmica de compensação do sinal de controle.

A introdução deste novo elo de realimentação adiciona um grau de liberdade extra na

determinação dos parâmetros de estabilização do sistema em malha fechada. Por outro lado, esta nova realimentação tem o potencial de instabilizar o sistema em malha fechada, dependendo das taxas de mudança da saída do compensador. Desta forma, a filtragem do sinal compensado tem um importante papel na estabilidade do sistema neste estratégia proposta. A partir da equação característica do sistema, determinada pelos parâmetros da planta a_1, a_2, \dots, a_{na} e b_1, b_2, \dots, b_{nb} , pelos parâmetros do controlador $\alpha c_1, \dots, \alpha c_{nac}$ e $\beta c_1, \dots, \beta c_{n\beta c}$ e pelos parâmetros do filtro k_f e γ , pode-se proceder a análise da estabilidade do sistema em malha fechada. Um exemplo desta análise é mostrada no item (5.4.3).

No próximo instante de amostragem, o sinal de controle é acrescido do valor acumulado do déficit do sinal de controle (eq. (4.8)) visando reduzir os efeitos do atraso T_{CA} na malha fechada. Isto é:

$$\hat{u}c_k = \hat{u}_k + ACC_{ud}, \quad (4.8)$$

em que \hat{u}_k representa o valor do sinal de controle calculado, usando a eq. (3.6), e $\hat{u}c_k$ representa o valor corrigido para o sinal de controle a ser aplicado no atuador. Após a transferência do valor acumulado para o atuador, o valor ACC_{ud} é zerado.

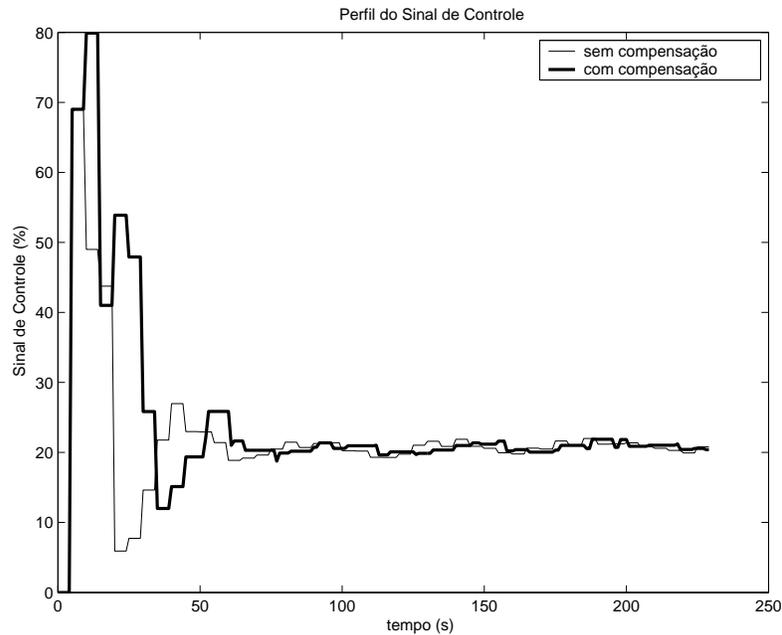


Figura 4.3: Efeito do esquema de compensação do sinal de controle

A Figura 4.3 apresenta um exemplo para comparação entre os valores de sinal de controle, com e sem compensação, calculados por um controlador PI, sujeito aos atrasos

conjuntos T_{SC} e T_{CA} . A Figura mostra o efeito causado pelo acréscimo do déficit do sinal de controle no valor a ser implementado pelo atuador.

Adaptação online

Sempre que o controlador recebe um novo valor de medição da saída da planta, o estimador é atualizado com o objetivo de melhorar o processo de estimação dos futuros valores. Considerando que os valores dos atrasos não são conhecidos com precisão, os parâmetros do modelo interno não são ajustados. A correção dos parâmetros do modelo sem as informações sobre os atrasos podem produzir um modelo não representativo do sistema. Fica evidente que o ajuste dos parâmetros do modelo interno não pode ser realizado considerando-se apenas os valores de entrada e de saída, independentemente dos valores para os tempos de atraso (sensor-controlador ou controlador-atuador atraso).

Assim, o esquema apresentado propõe controlar sistemas de controle via redes nos quais as variações dos tempos de atraso são compensadas pela execução do algoritmo proposto, sem conhecimento dos valores dos atrasos (*timestamp* das medidas). Para a execução do algoritmo do controle proposto são realizados os seguintes passos a partir do disparo por tempo para $tempo = h$:

- Passo 1) Ler o valor da saída da planta, \bar{y}_k (no nó sensor), e transmiti-lo ao controlador.
- Passo 2) Estimar o valor de saída da planta, \hat{y}_k , dado pela eq. (3.28).
- Passo 3) Calcular o sinal de controle, \hat{u}_k , usando a eq. (4.3).
- Passo 4) Calcular o sinal de controle compensado, \hat{u}_{Ck} , usando a eq. (4.8).
- Passo 5) Zerar o valor armazenado de ACC_{ud} .
- Passo 6) Enviar o sinal de controle ao atuador.
- Passo 7) Se uma nova medida chegar ao nó controlador, ir para o passo 8, caso contrário, ao final do período de amostragem, voltar ao passo 1.
- Passo 8) Ao receber a medida k (ação disparada por evento) são atualizados os valores de \hat{y}_{k-i+1} a \hat{y}_k , usando a eq. (3.29).
- Passo 9) Calcular o sinal de controle equivalente aplicado à planta, \bar{u}_{k-i-1} , usando a eq. (4.5).

- Passo 10) Calcular o déficit do sinal de controle, ud_{k-i-1} , usando a eq. (4.6).
- Passo 11) Calcular o déficit acumulado do sinal de controle, ACC_{ud} , usando a eq. (4.7) e voltar ao passo 7.

Arranjo experimental

O sistema de controle com compensação explícita do sinal de controle foi implementado na plataforma didática em conjunto com a Planta 1. Os parâmetros do modelo ARMAX, referente ao estimador, são obtidos a partir do modelo de primeira ordem da Planta 1, em Z (eq. (2.2)):

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 - 0,8574(z^{-1}) \\ B(z^{-1}) &= 0,0702(z^{-1}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Desta forma, o estimador usado no algoritmo de controle é dado pela eq. (4.10):

$$\hat{y}_k = 0,8574y_{k-1} + 0,0702u_{k-1}, \quad (4.10)$$

em que \hat{y}_k é a saída estimada para a planta, $y_{k-1} = \hat{y}_{k-1}$ é a saída da planta estimada no tempo $(k-1)h$, se $T_{SC} > h$, caso contrário, $y_{k-1} = \bar{y}_{k-1}$ (que é o valor de saída da planta medido no instante de amostragem $k-1$). O valor u_k representa o sinal de controle.

Como controlador é utilizado o controlador PI em z , apresentado na seção 3.2.1. A partir da equação de diferenças para controlador (eq. (3.6)), em cada instante de amostragem é calculado o sinal de controle, denominado \hat{u}_k , dado por:

$$\hat{u}_k = 6,90e_k - 6,36e_{k-1} + u_{k-1}, \quad (4.11)$$

O sinal de controle equivalente aplicado à planta no $(k-i-1)$ -ésimo instante de amostragem é estimado por:

$$\bar{u}_{k-i-1} = \frac{\bar{y}_{k-i} - 0,8574\bar{y}_{k-i-1}}{0,0702} \quad (4.12)$$

No capítulo seguinte, na seção 5.4, serão apresentados os resultados obtidos com a implementação desta proposta de controle.

4.3 Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes

A segunda proposta, denominada Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes, foi desenvolvida para ser implementada em sistemas nos quais as informações sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle estão disponíveis. A plataforma NCS-CMUF (descrita em 2.3.2) possibilita esta implementação. A proposta de controle considera ainda que os intervalos de amostragem para a medição da saída da planta e para o cálculo do sinal de controle são regulares.

O sistema de controle preditivo e adaptativo proposto trabalha com um estimador de valores de saída da planta em Delta, que possui características preditivas e adaptativas ao realizar a estimação de valores futuros em função do atraso T_{CA} presente no NCS. O sistema de controle proposto também utiliza um estimador online de parâmetros da planta; uma rotina de sincronização entre estações; um controlador PI com Preditor de Smith e ação “anti-windup”; uma rotina para detecção e confirmação de perdas de pacote e uma rotina preliminar para chaveamento de controladores.

A Figura 4.4 apresenta um esquema funcional da estratégia de controle proposta. O diagrama mostra na sua parte superior o sistema local, composto pela planta, pelo relógio local, pelas unidades de medição e atuação (nós sensor e atuador) e pelo controlador local, estas unidades são ligadas por uma rede CAN e formam o primeiro enlace de rede. O nó sensor envia valores medidos na saída da planta, via rede, para o controlador a cada instante de amostragem local, h_L , e o nó atuador recebe valores de ação de controle enviados via rede pelo controlador. Na parte inferior do diagrama é mostrado o sistema remoto, composto pelo relógio remoto, pelo estimador de saída da planta (disparado por tempo, h_R , e pelo evento *CHEGADA_DE_MEDIDA*), pelo estimador de parâmetros da planta (disparado pelo evento *CHEGADA_DE_MEDIDA*) e pelo controlador. A ação de execução do algoritmo de controle é disparada por tempo e ocorre em cada instante de amostragem remoto, dado por h_R . As duas estações são interligadas por um triplo enlace de rede: rede CAN (primeiro enlace), rede serial (segundo enlace) e Internet (terceiro enlace). A interação destes enlaces está representada na Figura 2.13. Ainda faz parte do esquema proposto, o algoritmo de sincronização entre os relógios local e remoto, também representado na Figura 4.4 pelo bloco *SINCRONIZAÇÃO* (MARTINS; JOTA, 2009a).

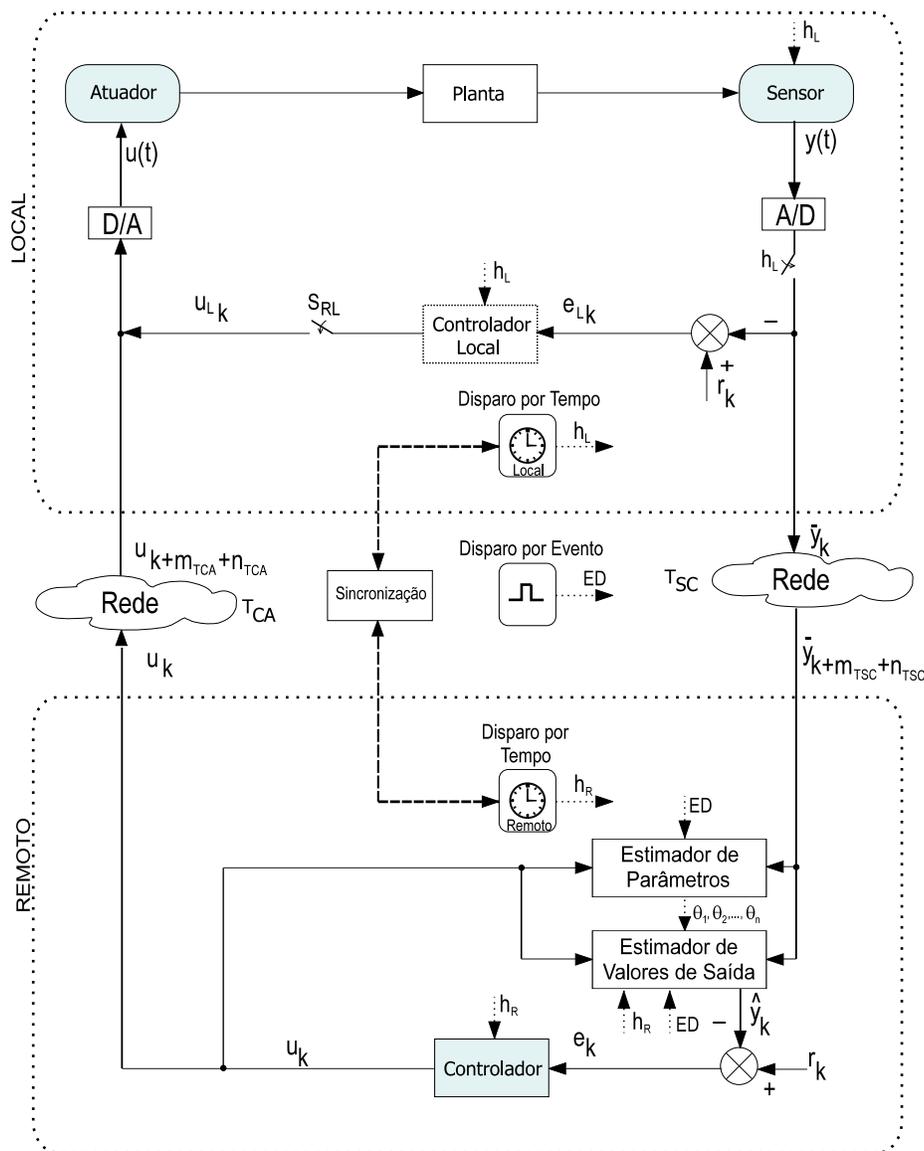


Figura 4.4: Diagrama funcional do Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes

4.3.1 Sincronização entre Controlador e Sensor/Atuador

Dentre os principais requisitos dos sistemas de controle amostrados, estão a regularidade e o sequenciamento das tarefas de amostragem, execução do algoritmo de controle e aplicação da ação de controle. Essa consideração faz parte da formulação matemática de discretização de um sistema real e contínuo. Em um sistema distribuído, a presença dos atrasos variáveis provocados pelo enlace da rede de comunicação compromete esta regularidade nos eventos de amostragem.

Para que seja mantida a estrutura convencional de disparo do controlador (disparo por tempo), garantindo regularidade e sequenciamento no processo de execução do algoritmo

de controle, é necessário a utilização de ferramentas de sincronização que possibilitem a manutenção de um relógio, ainda que relativo, comum entre os componentes.

A sincronização de relógios pode ser implementada por software, situação na qual os sinais de sincronização são enviados pela própria rede, ou por hardware, por meio de fiação especial que distribui sinais de clock aos elementos do sistema distribuído.

Vários esquemas de sincronização estão disponíveis na literatura, dentre eles (OORSCHOT, 1993), (CHRISTIAN; FETZER, 1994), (KIM; JI; AMBIKE, 2006) e (SCHEDL, 1996). A maioria destes esquemas utiliza o conceito do atraso de propagação. Estes esquemas baseiam-se na determinação da diferença de tempo relativo entre as estações de um sistema distribuído, o que é feito por meio de sucessivas sequências de envio e recepção de mensagens entre as várias estações da rede. O arranjo utilizado nesta proposta, descrito por Nilsson (NILSSON, 1998), também é baseado neste conceito.

Seja S o nó que deseja estimar a diferença de tempo para o nó R . Seja o relógio absoluto dado por t_i , o relógio local do nó S dado por t_i^S e o relógio local do nó R dado por t_i^R . Os relógios locais dos nós S e R possuem um deslocamento em relação ao relógio absoluto, dado por:

$$t_i^S = t_i + \chi^S \quad (4.13)$$

$$t_i^R = t_i + \chi^R \quad (4.14)$$

em que χ^S e χ^R são as diferenças de tempo em cada nó. A compensação de relógio, definida por χ , é dada por:

$$\chi = \chi^R - \chi^S \quad (4.15)$$

das eq. (4.13) e (4.14), vem:

$$t_i^S = t_i^R - \chi \quad (4.16)$$

A compensação de relógio terá um desvio no tempo, devido às imprecisões nos relógios locais. A sequência de sincronização começa com uma requisição da hora atual do nó R , feita pelo nó S , esta mensagem é enviada no instante de tempo t_a^S (MSG1), conforme mostra a Figura 4.5. O nó R recebe a mensagem do nó S e envia, imediatamente, uma

mensagem de retorno contendo o valor da sua hora local (MSG2), em t_b^R . Esta mensagem chega ao nó S no instante t_c^S (MSG3). Sejam T_{SR} e T_{RS} os tempos de transferência das mensagens do nó S para R e do nó R para o S , respectivamente. Estes intervalos podem ser escritos por:

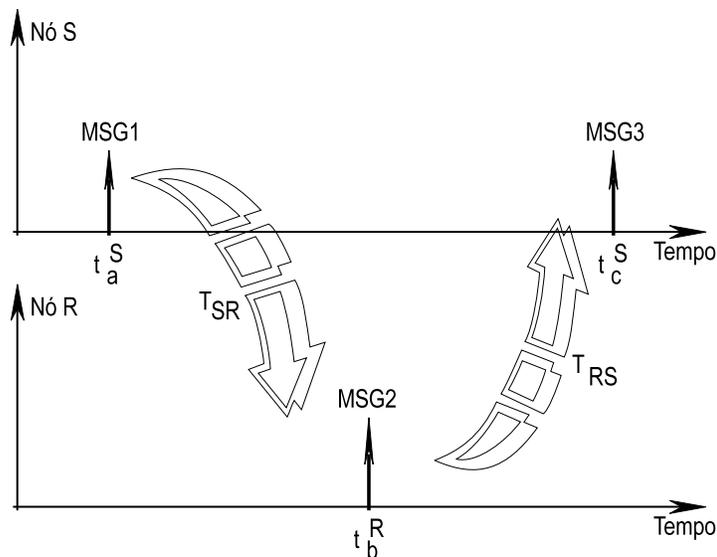


Figura 4.5: Sequência de mensagens para sincronização entre dois nós

$$T_{SR} = t_b^S - t_a^S = (t_b^R - \chi) - t_a^S \quad (4.17)$$

$$T_{RS} = t_c^S - t_b^S = t_c^S - (t_b^R - \chi) \quad (4.18)$$

Assumindo que $E(T_{SR} - T_{RS}) = 0$, em que E é a esperança matemática, tem-se:

$$\chi = E \left\{ \frac{2t_b^R - t_a^S - t_c^S}{2} \right\} \quad (4.19)$$

Repetindo-se a sequência de obtenção de χ , descrita anteriormente, por um número suficientemente grande de vezes (do ponto de vista estatístico) e realizando um tratamento estatístico dos valores obtidos, pode-se obter uma estimativa bastante precisa do valor para a compensação de relógio entre as estações, representado por χ .

Na arquitetura proposta, o nó S é o ponto correspondente ao controlador (estação remota), ou seja, é o computador no qual será executado o algoritmo de controle e que estará interligado à malha de controle pela Internet; o nó R corresponde ao nó no nível da planta (estação local). Para este esquema de sincronização utilizou-se o nó sensor para troca de informações com o computador (controlador). A Figura 4.6 mostra a sequência de

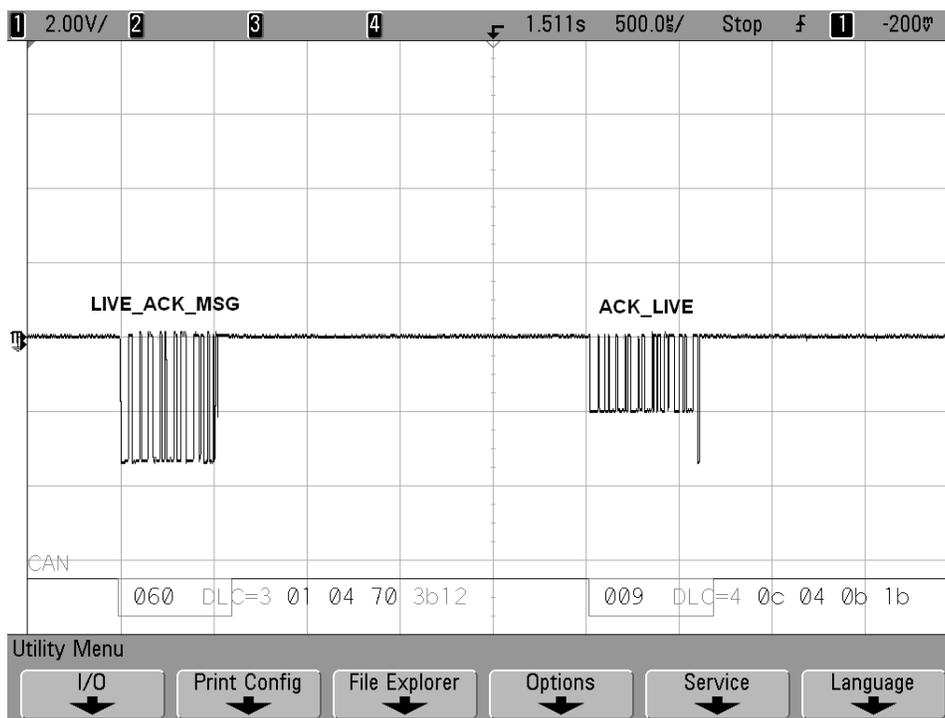


Figura 4.6: Sequência de recepção de solicitação e resposta pelo nó remoto

recepção da mensagem de teste proveniente do nó S e a resposta do nó R , para esta função foi configurada uma mensagem no protocolo CMUF, do tipo procedimento, denominada *LIVE_ACK_MSG* que retorna um *ACK_LIVE* à estação solicitante. O tempo de processamento com retorno padrão para mensagens nos nós CAN da plataforma NCS-CMUF é de 2,5 ms, este atraso de processamento é incorporado no atraso de comunicação.

A estimação do valor de χ , eq. (4.19), é realizada a partir da execução de sucessivos procedimentos de envio/recepção de mensagens entre dois nós do NCS, no processo de inicialização do controlador. Na estrutura de testes implementada, trabalhou-se com o valor de dez amostras, no mínimo, para a estimação inicial. Para cálculo do valor médio inicial de χ foi utilizado um filtro para cálculo da média móvel, com a janela móvel de dez medidas. O valor final é utilizado pelo algoritmo de controle para sincronizar as estações local e remota.

Para a execução dos algoritmos de sincronização e controle, foram adicionadas funcionalidades à tela original de conexão do Projeto CMUF. A tela em questão consiste de um aplicativo desenvolvido em Delphi (FERNANDES, 2006) (JACQUES, 2006), que funciona como servidor de conexões e alimentador do banco de dados do CMUF. A esta tela foram adicionadas funções de conexão Servidor/Cliente, execução de algoritmo de controle (disparado por tempo ou evento), alteração de setpoint, habilitação do nó sensor, alteração do

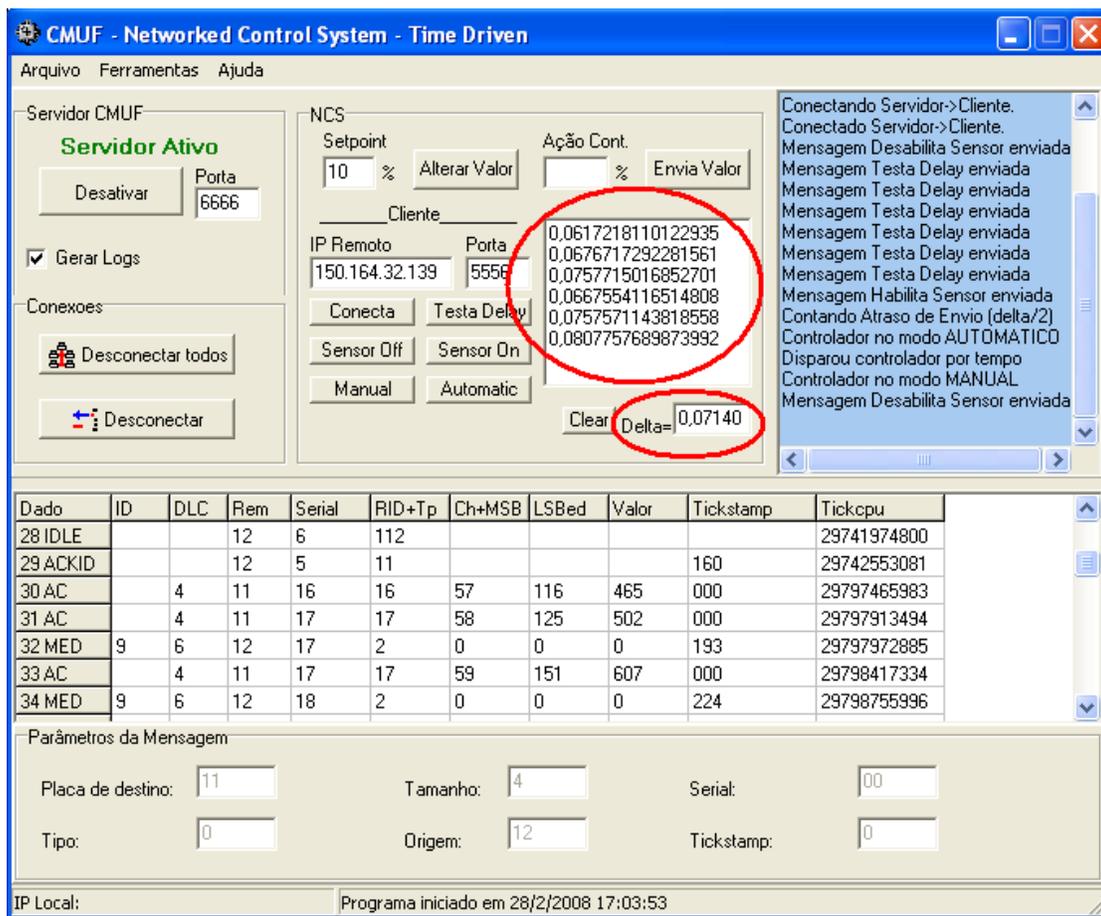


Figura 4.7: Tela de comando e supervisão NCS-CMUF

modo de funcionamento do controle: automático ou manual (com envio do sinal de controle), envio de mensagem de teste de atraso e execução do algoritmo de sincronização. Na Figura 4.7, é mostrada a tela de execução do algoritmo de controle disparado por tempo com sincronização. Nesta tela são mostrados os resultados dos cálculos de χ para alguns eventos testes. A área destacada pelo círculo maior apresenta os valores instantâneos de χ , em segundos. A área destacada pelo círculo menor apresenta o valor médio de χ (denominado *Delta*), em segundos, conforme mostram a eq. (4.19) e a figura 4.9. A Figura 4.8 mostra os valores para o atraso global para 100 disparos de mensagens de teste de atraso na plataforma NCS-CMUF composta por 3 níveis de rede (CAN, serial e Internet); nesta Figura fica claro o caráter aleatório dos atrasos em um NCS pela Internet.

O tempo médio estimado para χ é o tempo considerado para para o disparo do algoritmo de controle. Seja o instante de amostragem do nó sensor igual a $h_L = t_i^R(k)$ (estação local); o instante para a execução do algoritmo de controle dado por $h_R = t_i^S(k)$ (estação remota) e considerando que o comando para disparo dos relógios local e remoto parte da

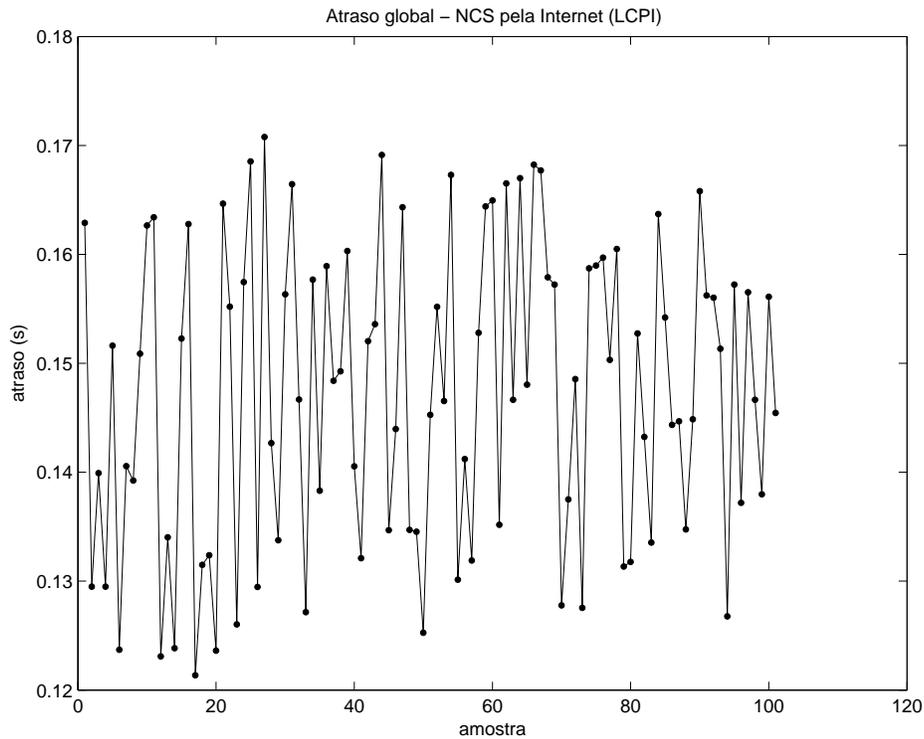


Figura 4.8: Exemplo de um perfil de comportamento dos atrasos globais no NCS-CMUF

estação remota (controlador), o algoritmo de controle (e o relógio remoto, h_R) deverá ser disparado no instante $t_i^S(k) + \chi$, eq. (4.16), conforme mostra a Figura 4.9.

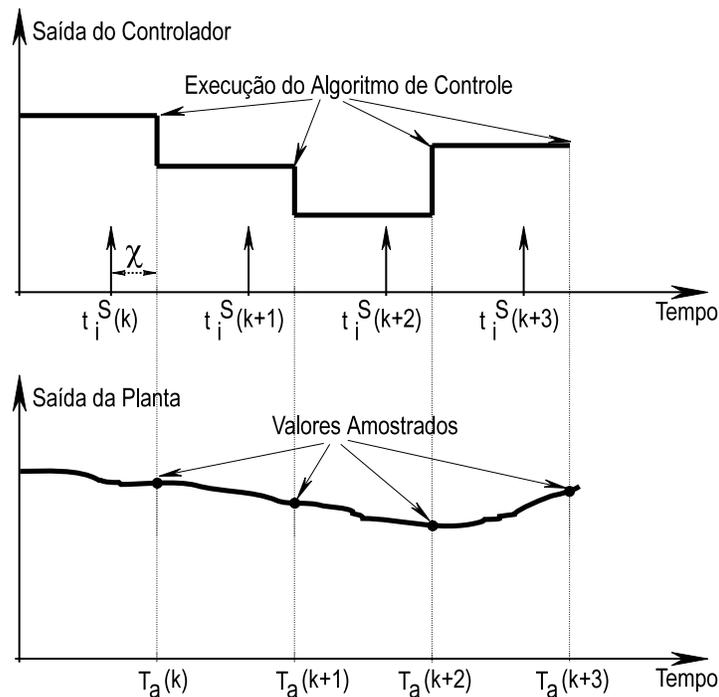


Figura 4.9: Sincronização entre os eventos de amostragem e controle no NCS-CMUF

O início da execução do algoritmo de controle disparado por tempo com sincronização é feito por meio do envio do comando para disparo das medições da saída da planta no nó sensor. O envio desta função, chamada *HABILITA_LEITURA_NÓ*, inicia um ciclo infinito de medições disparadas por tempo no nó sensor. O intervalo de amostragem no nó sensor pode ser alterado remotamente por meio do envio da mensagem *ALTERA_AMOSTRAGEM_NÓ*. Em função da estrutura de temporização utilizada, o período de amostragem pode ser ajustado como qualquer valor múltiplo de 125 ms. Ao ser iniciada a função de leitura disparada por tempo no nó sensor, é decorrido um tempo para inicialização das funções de contagem e temporização no nó. Este tempo é fixo e vale 11,9 ms e também é adicionado no algoritmo de sincronização e utilizado para disparar o controlador, de forma que o valor considerado ao final da execução do algoritmo será χ_{cor} em milisegundos, dado pela eq. (4.20). Este atraso de tempo entre o envio do comando para acionamento do sensor e a execução da primeira leitura pode ser visto na Figura 4.10. Decorrido o tempo dado por χ_{cor} , o controlador é acionado. Inicialmente é habilitado um temporizador com preset igual ao período de amostragem. No caso deste exemplo 125 ms, a cada ciclo completo do temporizador é realizado o *scan* do algoritmo de controle. Desta forma, o *scan* da primeira passagem do algoritmo de controle coincide com a segunda medição da saída da planta. O trecho do programa de controle, desenvolvido em Pascal-Delphi, responsável pela sincronização entre as estações local e remota é apresentado no Apêndice B, na seção B.1.

$$\chi_{cor} = \chi + 11,9 \quad (4.20)$$

Validação do Algoritmo de Sincronização

Para comprovar a validade do algoritmo de sincronização utilizado neste trabalho, será analisada a sequência de mensagens que trafegam na rede CAN (nível da planta) durante o processo de inicialização do controlador disparado por tempo com sincronização, conforme mostra a Figura 4.11.

A mensagem número 1 é a mensagem *COMANDO_LIGA_SENSOR* enviada pelo controlador ao nó sensor, pela Internet, disparando o processo de leituras sucessivas com disparo por tempo. A mensagem seguinte, de número 2, é a mensagem de confirmação da habilitação do nó sensor (*ACK_SENSOR_LIGADO*). Após decorrido o tempo de inicialização e configuração do nó sensor (Figura 4.10), este inicia o ciclo infinito de leituras do valor de saída da planta a cada intervalo de amostragem (no teste apresentado na Figura, o valor da amostragem é de 125 ms). As mensagens referentes às medições são

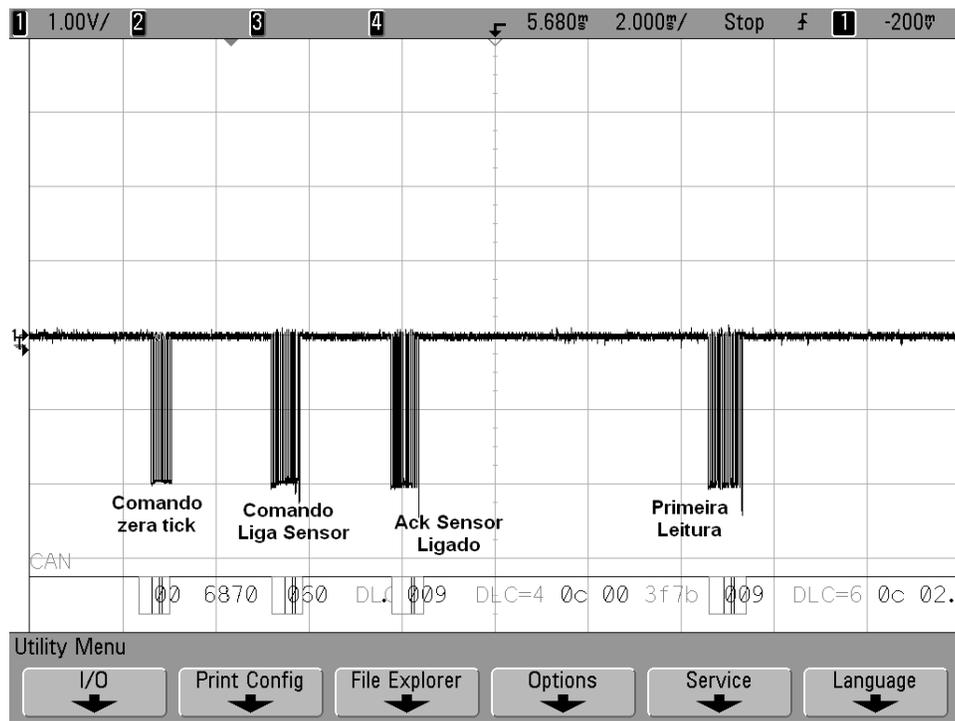


Figura 4.10: Atraso de tempo no acionamento do sensor no NCS-CMUF

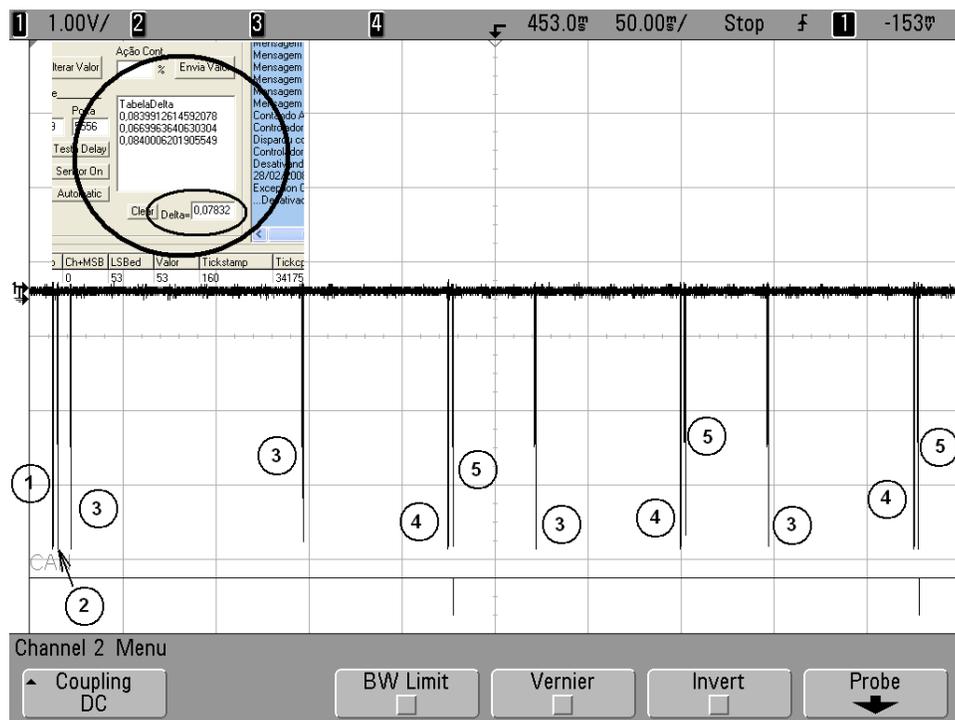


Figura 4.11: Sequência de mensagens iniciais na rede CAN do NCS-CMUF

representadas na Figura pelo numeral 3 e seguem em direção ao controlador contendo o valor da medição, um número serial sequencial e o tickstamp do instante da medição.

As mensagens representadas pelo número 4 são os sinais de controle que trafegam pela rede em direção ao nó atuador. Estas mensagens são enviadas pela Internet, recebidas pelo *webserver*, condicionadas no formato do protocolo CMUF, enviadas para o *gateway* da rede CAN pela porta serial e, finalmente, transmitidas para a rede CAN em direção ao nó atuador.

O nó atuador, após implementar a ação de controle, devolve um sinal de *Ack* ao controlador, representado pelas mensagens de número 5. Essa mensagem segue o caminho contrário do sinal de controle, ou seja, percorre o trajeto: nó atuador \rightarrow rede CAN \rightarrow *gateway* \rightarrow rede serial RS 232 \rightarrow *webserver* \rightarrow Internet \rightarrow controlador. Esta mensagem contém o valor da ação de controle implementada, o número serial referente à mensagem de ação controle aplicada e o tickstamp do instante da efetivação.

Na Figura 4.11 ainda, é mostrado como detalhe, na parte superior esquerda, o bloco da tela de controle referente ao algoritmo de sincronização. Nesse detalhe observam-se os valores instantâneos de χ : 0,084, 0,067, e 0,084 e, o valor médio calculado de χ : 0,0783, ou seja 78,3 ms. O valor implementado pelo algoritmo, dado pela eq. (4.20), vale $\chi_{cor} = 88$ ms. Este tempo é o atraso considerado para início da execução do algoritmo de controle disparado por tempo que, teoricamente, fará com que o momento de amostragem do sensor se aproxime do momento da amostragem do controlador. Na Figura observa-se que o tempo entre as amostragens no sensor (mensagens de número 3) e no controlador (mensagens de número 4) ficam em torno de 80 ms, que é muito próximo do valor de χ , indicando que os valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} se aproximam deste valor e que o instante de amostragem do controlador está muito próximo do instante de amostragem do nó sensor, objetivo primário do esquema de sincronização.

4.3.2 Estimação Online dos Parâmetros da Planta

O estimador online de parâmetros da planta, apresentado na seção 3.3.3, foi implementado nesta proposta de controle com a finalidade de estimar valores para a atualização dos parâmetros usados no estimador de valores de saída da planta.

Validação do estimador online dos parâmetros da planta

Os testes para a validação do algoritmo do estimador de parâmetros da planta foram realizados na plataforma NCS-CMUF (seção 2.3.2) utilizando como planta, a Planta 2 (seção 2.2.2) e como controlador foi utilizado o controlador PI, em z (seção 3.2.2), com uma amostragem de 125 ms (eq. (3.10) e (3.11)). Como se trata de um sistema de

primeira ordem, a estrutura do modelo para a estimação de parâmetros é dada pela eq. (4.21).

$$y(k) = \alpha y(k-1) + \beta u(k-1) \quad (4.21)$$

em que

- $\boldsymbol{\theta}(k) = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \end{bmatrix}^T$
- $\boldsymbol{\varphi}(k) = \begin{bmatrix} y(k-1) & u(k-1) \end{bmatrix}$
- $\lambda = 0,98$, o que representa uma janela temporal assintótica de 50 amostragens.

A Figura 4.12 mostra a comparação entre os valores nominais e os estimados para os parâmetros $\theta_1 = e^{-h/\tau}$ e $\theta_2 = K(1 - \theta_1)$, utilizando o algoritmo de mínimos quadrados recursivos, com fator de esquecimento e garantia de estabilidade numérica por meio da fatoração U-D, ao longo de 640 amostras (80 s) para o sistema denominado planta 2 em malha fechada, com controlador disparado por tempo. O gráfico mostra a eficácia do algoritmo na estimação dos parâmetros do modelo. A Figura 4.13 mostra o comportamento do atraso T_{CA} durante a estimação dos parâmetros.

O trecho do programa de controle responsável pelo estimador de parâmetros da planta é apresentado no Apêndice B, na seção B.2.

4.3.3 Estimação dos Valores de Saída da Planta

Um estimador para os valores de saída da planta em delta, conforme apresentado na seção 3.3.2, foi utilizado nesta proposta de sistema de controle.

Validação do estimador de valores de saída da planta

Para avaliar o algoritmo proposto para o estimador de valores de saída da planta, foram realizados testes na plataforma NCS-CMUF utilizando como planta, a Planta 2 e como controlador, foi utilizado o controlador PI em z . Nesta etapa de testes, a medição é realizada de maneira autônoma pelo nó sensor e disparada por tempo, com base no relógio local h_L , e o tempo de amostragem é 125 ms. Escrevendo o modelo contínuo da planta (eq. (2.3)) no formato de equação pseudo-contínua conforme mostrado na eq. (3.34), tem-se:

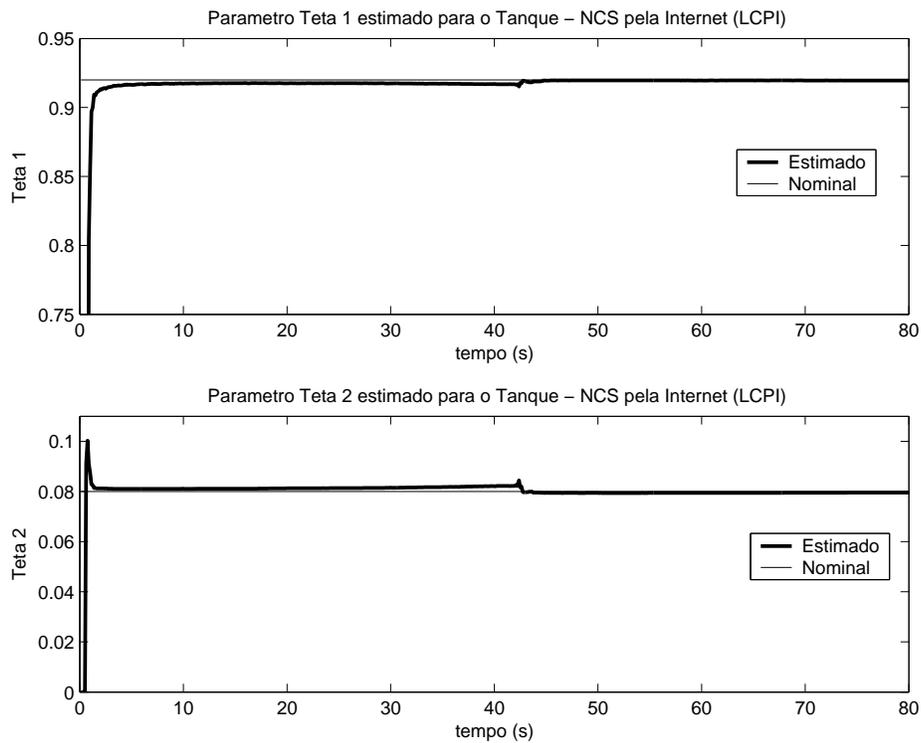


Figura 4.12: Valores estimados pelo MQR para os parâmetros $\theta_1 = \alpha$ e $\theta_2 = \beta$ na planta 2

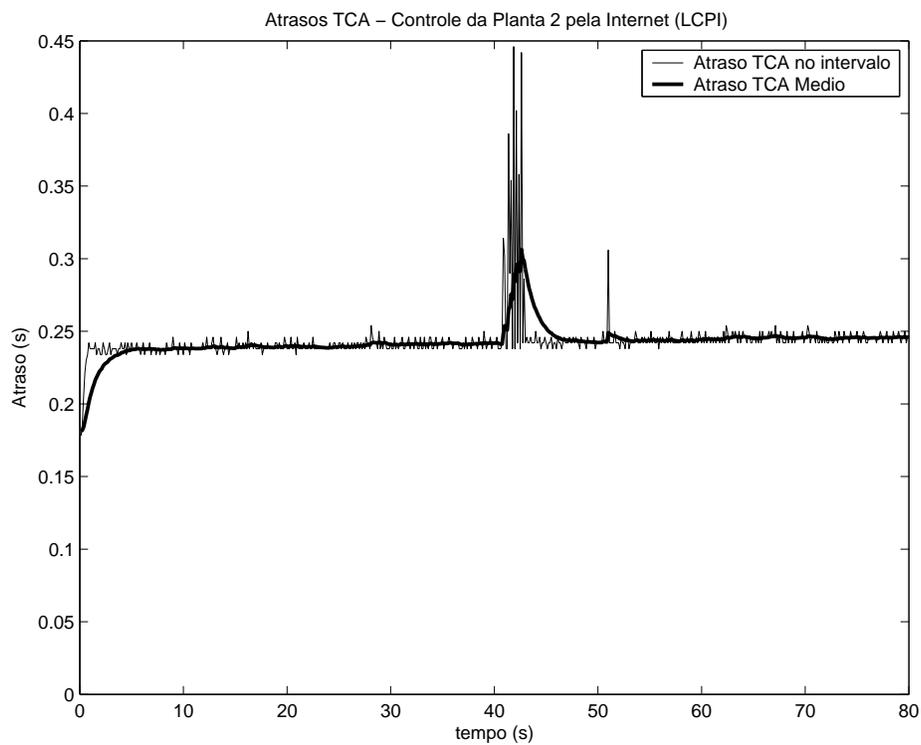


Figura 4.13: Perfil do atraso T_{CA} durante a estimação dos parâmetros θ_1 e θ_2 na Planta 2

$$1,5\delta y(\Delta) + y(\Delta) = u(\Delta - T_{CA}(\Delta)) \quad (4.22)$$

em que $T_{CA}(\Delta)$ representa o atraso T_{CA} referente ao sinal de controle correspondente.

Substituindo a eq. (3.14) na eq. (4.22):

$$1,5 \left(\frac{y(k) - y(k-1)}{\Delta} \right) + y(k-1) = u(k-1 - T_{CA}(k-1)) \quad (4.23)$$

em que $T_{CA}(k-1)$ é o atraso de tempo entre controlador e atuador na amostragem $k-1$, em que $k = \text{floor}(t/h)$.

Resolvendo para $y(k)$ e considerando $\Delta \rightarrow h$ e $n\theta_p = 0$ tem-se as equações pseudo-contínuas do estimador, no formato de equações de diferenças (eq. (4.24) e (4.25)):

$$\hat{y}_{INT}(k) = \left(1 - \frac{\overline{n_{TCA}}}{1,5} \right) y(k-1) + \frac{\overline{n_{TCA}}}{1,5} u(k-2 - \overline{m_{TCA}}) \quad (4.24)$$

$$\hat{y}(k) = \left(1 - \frac{h - \overline{n_{TCA}}}{1,5} \right) \hat{y}_{INT}(k) + \frac{h - \overline{n_{TCA}}}{1,5} u(k-1 - \overline{m_{TCA}}) \quad (4.25)$$

No Apêndice B deste texto são mostrados trechos do programa do controlador responsáveis pela estimação e atualização do estimador de valores de saída da planta para o exemplo anterior.

Na Figura 4.14, é feita uma comparação entre os valores medidos e estimados com um estimador em z (seção 3.3.1), para a Planta 2, em malha fechada, utilizando a plataforma NCS-CMUF. Em função da existência dos atrasos T_{CA} , as previsões se afastam dos valores reais em amplitude e em fase, proporcionando valores distorcidos para serem utilizados na equação de controle, o que gera uma resposta bastante oscilatória no sistema. Na Figura 4.15, novamente é feita a comparação entre os valores medidos e estimados, para a Planta 2, em malha fechada, utilizando a plataforma NCS-CMUF, desta vez com o estimador em δ . Pode-se observar a melhoria dos valores estimados, em amplitude e em fase, também pode-se observar o efeito positivo da atualização das previsões para os valores de saída da planta.

O apêndice A mostra uma sequência de dados processados pelo algoritmo do controlador, incluindo: mensagens recebidas, enviadas, variáveis internas, cálculo dos atrasos e os valores resultantes do algoritmo de estimação proposto. Os resultados do algoritmo de estimação podem ser vistos nos blocos -----Amostragem calcula AC-----.

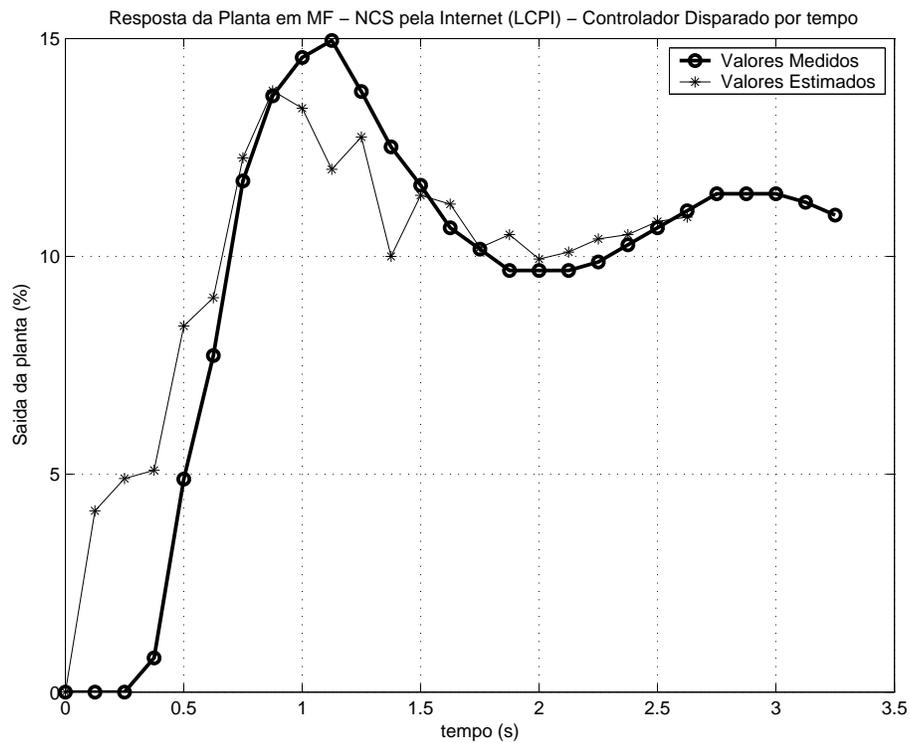


Figura 4.14: Comparação entre os valores estimados em z e medidos para o NCS-CMUF

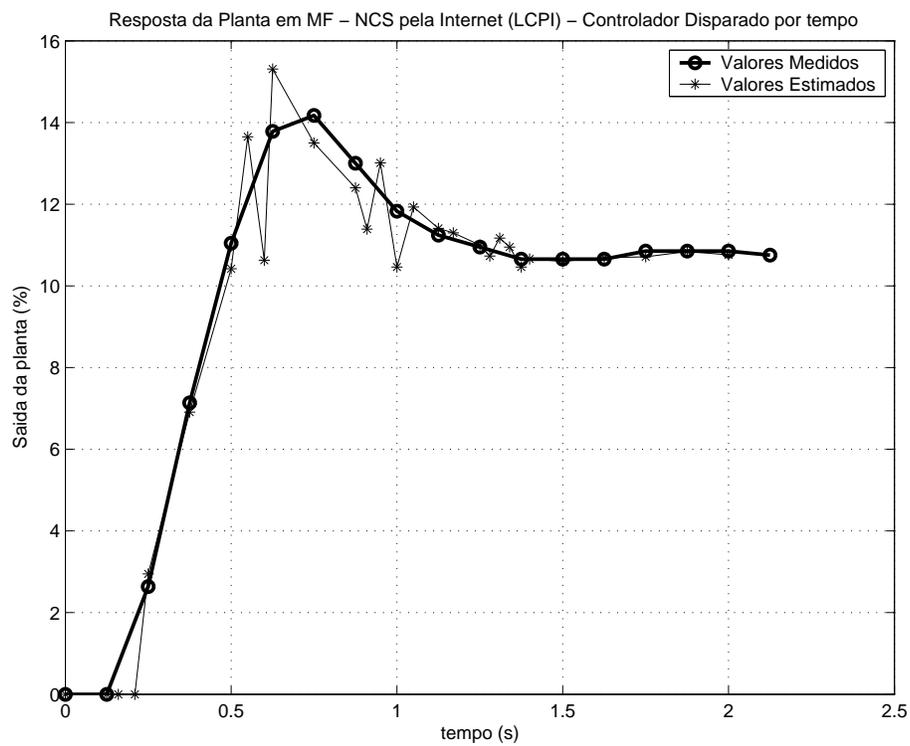


Figura 4.15: Comparação entre os valores estimados em δ e medidos para o NCS-CMUF

4.3.4 Cálculo da Ação de Controle

O algoritmo de controle é implementado no computador remoto. A partir de uma conexão pela Internet, o computador controlador troca informações com as unidades sensoras e atuadoras localizadas no nível da planta. Essa conexão se dá por meio de um socket TCP entre o computador remoto e o *webserver*, e um outro link serial RS232 entre o *webserver* e a rede CAN (Figura 2.13). Os valores obtidos pelo estimador para a saída da planta, descrito no item anterior, são utilizados para alimentar o algoritmo de controle digital a ser implementado no computador remoto.

Nesta etapa de testes, o controlador foi implementado no formato de equação de diferenças e adicionado ao aplicativo Delphi de conexão do CMUF (ver em 4.3.1). O disparo da execução do algoritmo de controle é feita por tempo, com base no relógio remoto (h_R), que no caso é o relógio do computador. O início da sequência infinita de disparos por tempo é determinado pelo algoritmo de sincronização descrito em 4.3.1.

Para os testes desta proposta de controle foram implementados o controlador PI em z para controle da Planta 2 e o controlador PI com Preditor de Smith para controle da Planta STI, conforme mostrado nas seções 3.2.2 e 3.2.4, respectivamente. No capítulo seguinte, na seção 5.5, são apresentados os resultados com estes dois controladores.

Ao final da execução do algoritmo de controle, o valor calculado para a ação de controle, $u(k)$, é enviado para o nó atuador, via Internet, e percorre os 3 níveis de rede: Internet, serial e CAN. Ao chegar ao nó atuador, o valor da ação de controle é imediatamente implementada na planta (ação disparada por evento) e uma mensagem de *Acknowledge* é enviada ao controlador contendo o *timestamp* do instante de efetivação da ação. Este valor de *timestamp* será utilizado no cálculo do atraso T_{CA} . O trecho do programa de controle responsável pelo cálculo da ação de controle, utilizando um controlador PI, é apresentado no Apêndice B, na seção B.5.

A Figura 4.16 mostra uma sequência de mensagens recebidas e enviadas pela estrutura local (nós sensor e atuador) na rede CAN durante um período de 1 segundo. A Tabela 4.1 lista a sequência e o significado de cada mensagem no intervalo de tempo analisado.

4.3.5 Chaveamento entre os Controladores Local e Remoto

Em um sistema de controle via redes no qual a Internet faz parte do loop de controle, a possibilidade de perda do enlace de comunicação nesse nível de rede precisa ser

Tabela 4.1: Lista de Mensagens na rede CAN mostradas na Figura 4.16

No do Frame	Tipo	No serial	Valor	Tickstamp
1	Medida	90	9,97	88h
2	Ação de Controle	88	8,57	-
3	<i>Ack</i> de Ação de Controle	88	-	A5h
4	Ação de Controle	89	9,26	-
5	<i>Ack</i> de Ação de Controle	89	-	AAh
6	Medida	91	9,87	A7h
7	Medida	92	9,87	C6h
8	Ação de Controle	90	9,51	-
9	<i>Ack</i> de Ação de Controle	90	-	DBh
10	Ação de Controle	91	10,13	-
11	<i>Ack</i> de Ação de Controle	91	-	E8h
12	Medida	93	9,87	E6h
13	Medida	94	10,06	0Bh
14	Medida	95	10,16	2Ah
15	Ação de Controle	92	10,39	-
16	<i>Ack</i> de Ação de Controle	92	-	2Ch
17	Ação de Controle	93	10,64	-
18	<i>Ack</i> de Ação de Controle	93	-	2Ch
19	Ação de Controle	94	10,17	-
20	<i>Ack</i> de Ação de Controle	94	-	4Bh
21	Medida	96	10,26	49h
22	Medida	97	10,26	69h
23	Ação de Controle	95	8,78	-
24	<i>Ack</i> de Ação de Controle	95	-	87h
25	Ação de Controle	96	8,51	-
26	<i>Ack</i> de Ação de Controle	96	-	8Ah

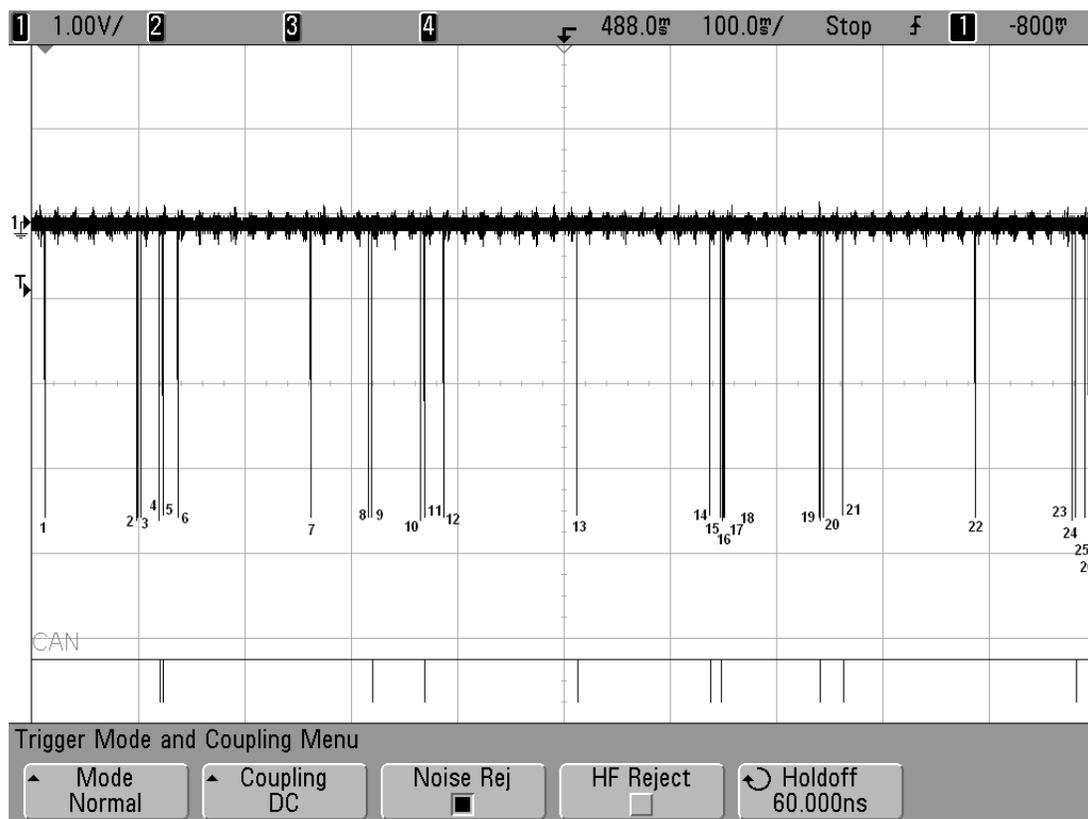


Figura 4.16: Sequência de mensagens na rede CAN no NCS-CMUF em malha fechada

considerada. A solução mais plausível para este evento é a transferência automática (chaveamento) do controlador remoto, momentaneamente isolado pela perda de link, para um controlador local, situado no nível da planta.

A utilização de chaveamento de controladores é apresentada por vários autores como por exemplo Morse, Mayne e Goodwin (MORSE; MAYNE; GOODWIN, 1992), Jota e Goodwin (JOTA; GOODWIN, 1997), Leonessa, Haddad e Chellaboina (LEONESSA; HADDAD; CHELLABOINA, 2001) e Pena (PENA, 2002). Estes trabalhos apresentam a utilização de controladores chaveados para sistemas nos quais as condições operacionais se alteram ou ainda, quando a planta apresenta características não lineares, situações nas quais a resintonia do controlador passa a ser necessária para manutenção da qualidade do sistema em malha fechada. Estas estratégias de chaveamento são caracterizadas pela mudança da lei de controle, quando o sistema tem sua condição operacional alterada. Desta forma pode-se, em princípio, manter as características desejadas de servomecanismo durante os transientes e rejeição a perturbações em estado estacionário em diferentes condições operacionais. Estes sistemas apresentam como principais vantagens a manutenção do (baixo) tempo de resposta, boas características estacionárias e maior flexibilidade de projeto. Por

outro lado, o chaveamento entre ganhos de controladores, se não for feito adequadamente, pode causar longos transientes, descontinuidades indesejáveis no controlador e até instabilidade ao sistema (MCCLAMROCH; KOLMANOBSKY, 2000). A questão de chaveamento de controladores é um problema de complexidade relativamente elevada, envolvendo questões de transição e simultaneidade de sistemas contínuos e discretos, sistemas híbridos e estabilidade.

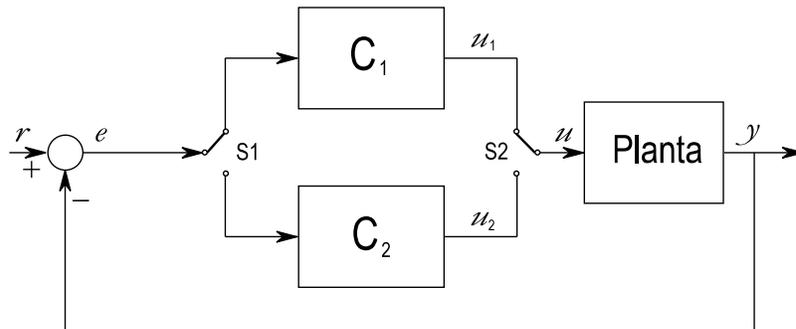


Figura 4.17: Esquema para chaveamento de controladores com chaveamento nos sinais de erro e de controle

No trabalho de Pena (PENA, 2002) é feita uma análise detalhada da aplicação de chaveamento em controladores. No trabalho é apresentada uma classificação quanto ao tipo de chaveamento que pode ser implementado nos sistemas de controle. A Figura 4.17 mostra a configuração de um sistema de controle chaveado com dois controladores (C_1 e C_2 , em que $C_1 \neq C_2$).

O chaveamento entre os controladores pode ser classificado como “Brusco” ou “Suave”. Ambos podem contar com chaveamento apenas do sinal de controle (S2) ou com chaveamento do sinal de controle (S2) e do sinal de erro (S1).

Entende-se por chaveamento “Brusco” aquele no qual a transferência entre C_1 e C_2 , ou vice-versa, é feita em uma única amostragem, enquanto no chaveamento “Suave” utiliza-se mais de uma amostragem para a transição de controladores. Os resultados apresentados no trabalho, para a planta analisada, mostraram que o chaveamento do sinal de erro provocou grandes oscilações na malha fechada de forma que se optou pela manutenção do sinal de erro em ambos controladores. O chaveamento com melhor resultado, então, foi o chaveamento apenas do sinal de controle. Dentre as duas possibilidades para comutação do sinal de controle, o chaveamento “Brusco” apresentou melhor desempenho que o “Suave” (PENA, 2002).

A Figura 4.18 apresenta uma estrutura de chaveamento de controladores aplicada a um NCS, em que os controladores a serem chaveados são os controladores Local e Remoto.

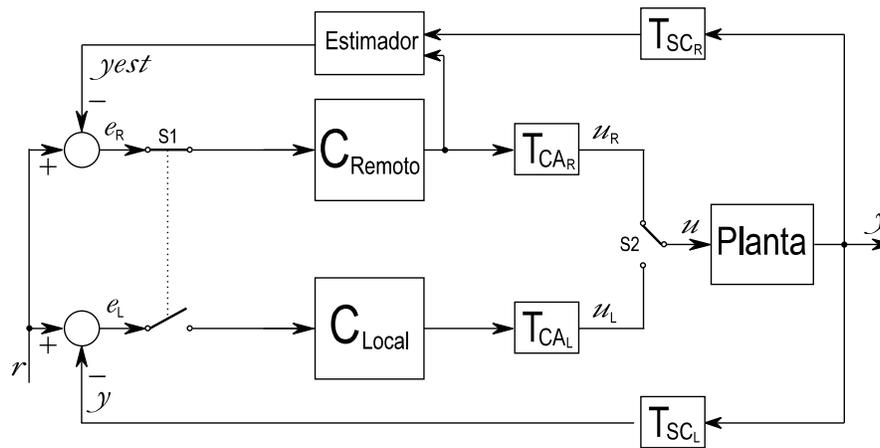


Figura 4.18: Esquema para chaveamento de controladores com chaveamento nos sinais de erro e de controle em um NCS

A aplicação de chaveamento de controladores em NCS apresenta diferenças importantes em relação às aplicações convencionais descritas no começo deste tópico, tais como:

- Enquanto C_1 e C_2 são sempre diferentes nas aplicações convencionais (Figura 4.17), C_{Local} e C_{Remoto} podem ser iguais.
- Enquanto C_1 e C_2 trabalham com o mesmo sinal de erro, C_{Local} e C_{Remoto} podem receber sinais de erro diferentes uma vez que, em função da presença dos atrasos, utilizam-se valores estimados para a saída da planta no controlador remoto, enquanto o controlador local pode receber sinal de erro resultante do sinal de saída medido.
- Ainda que C_{Local} e C_{Remoto} sejam iguais, os sinais de controle u_L e u_R podem ser diferentes em função do sinal de erro recebido.
- Ainda que os sinais u_L e u_R sejam iguais, produzirão efeitos diferentes na planta em função da diferença entre os atrasos T_{CAL} e T_{CAR} .

Neste trabalho foi feita a implementação de um sistema preliminar de chaveamento entre os controladores remoto e local. Este chaveamento preliminar foi feito apenas para a avaliação deste tipo de estrutura. A idéia básica utilizada considera a utilização de um controlador local, com funcionalidade de espera a quente “hot standby”, ou seja, no caso da perda de link entre as unidades Local e Remota, haverá uma comutação automática para o controlador Local, que assume o controle da malha fechada fazendo com que o NCS passe a funcionar apenas no nível local. A regra para a comutação automática

será baseada no número de períodos de amostragem com amostragem vazia para sinal de controle, de forma que o comando de acionamento do controlador local será enviado sempre que o atuador permanecer por 10 períodos de amostragem (equivalente a uma constante de tempo da malha aberta) sem receber sinal de controle do sistema remoto.

O controlador local possui a mesma estrutura e os mesmos ganhos do controlador remoto. Mas, em função da reduzida relação entre atrasos e tempo de amostragem para esta condição operacional, ou seja $T_{CAL} \ll h$ e $T_{SCL} \ll h$, conforme mostrado na seção 2.3.2, os atrasos foram desconsiderados do sistema para esta configuração. Desta forma foi utilizado um controlador local disparado por evento, evento *CHEGADA_DE_MEDIDA*, que passa a ter um funcionamento equivalente a um controle digital convencional.

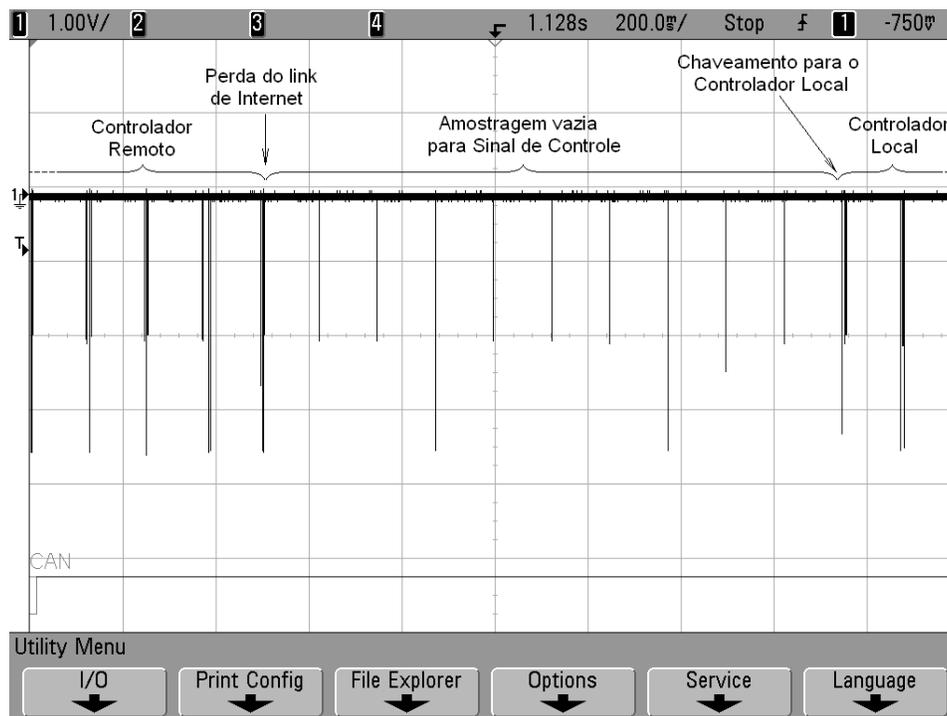


Figura 4.19: Sequência de mensagens na rede CAN na plataforma NCS-CMUF em uma situação de perda de link de Internet

Para a plataforma NCS-CMUF foi implementada a estratégia de chaveamento com manutenção do sinal de erro em ambos controladores e chaveamento brusco apenas do sinal de controle. A Figura 4.19 mostra uma sequência de mensagens na rede CAN durante uma perda de link na Internet; observa-se em destaque o intervalo de tempo com sucessivos períodos de amostragem vazia para o sinal de controle equivalente a 10 períodos de amostragem e, em seguida, a retomada do envio de sinais de controle agora por parte do controlador local. Na Figura 4.20, é mostrado o efeito da comutação dos controladores no comportamento do sistema. Na Figura 4.21, são mostradas as alterações implementadas

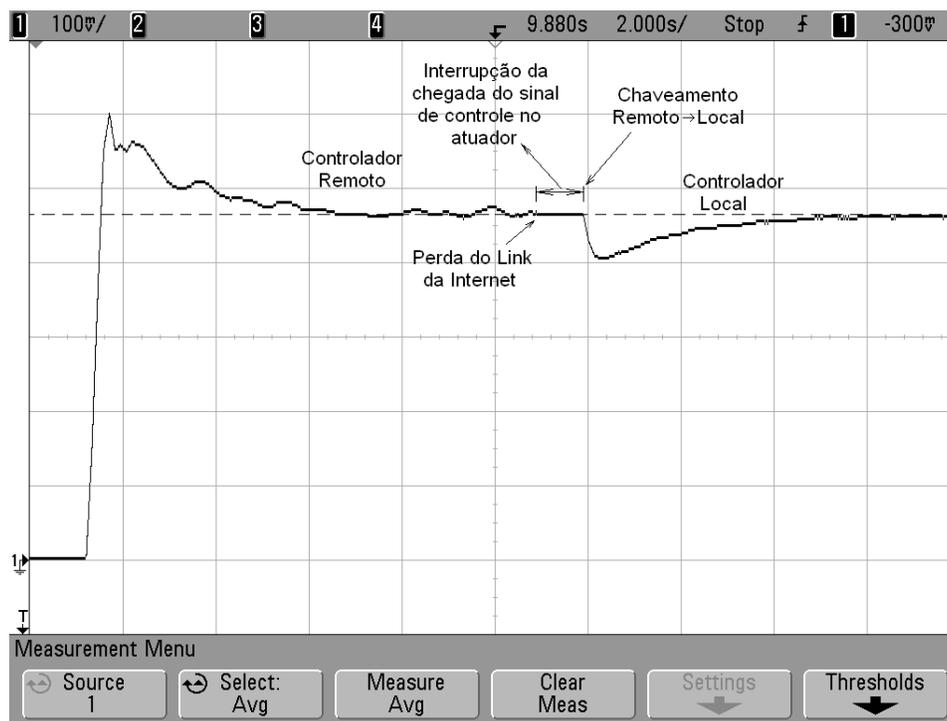


Figura 4.20: Resposta da planta 2 na plataforma NCS-CMUF utilizando a técnica de chaveamento automático do controlador remoto para o local

Dado	ID	DLC	Rem	Serial	RID+Tp	Ch+MSB	LSBed	Valor	Tickstamp	Tickcpu
220 Ack			11	78	3				18	25153345847
221 AC		4	11	81	81	57	24	97	000	25153786935
222 MED		9	6	12	80	2	0	103	33	25154043097
223 Ack			11	79	3				48	25154043843
224 MED		9	6	12	81	2	0	104	65	25154044264
225 Ack			11	80	3				80	25154044778
226 AC		4	11	82	82	58	22	90	000	25154220235

Figura 4.21: Tela de comando e supervisão da plataforma NCS-CMUF modificada para acionamento dos controladores

na tela de controle da plataforma NCS-CMUF em virtude do chaveamento dos controladores: foram colocados botões individuais para ligar e desligar os controladores Local e Remoto de forma manual, complementando o chaveamento automático.

4.3.6 Perda de Pacotes

O módulo para avaliação de perda de pacotes, apresentado na seção 3.4, foi implementado nesta proposta de sistema de controle. Nos testes realizados, todas as mensagens referentes aos valores medidos da saída da planta e sinais de controle enviados para a planta foram monitorados e não foram detectados perda de pacote em nenhum dos testes.

No capítulo seguinte, na seção 5.5, serão apresentados os resultados obtidos com a implementação desta proposta de controle.

4.4 Conclusão

Em sistemas de controle via redes, a presença dos atrasos induzidos pela rede impede a regularidade da amostragem nas tarefas de medição, controle e atuação. A presença do atraso T_{SC} faz com que o valor medido pelo sensor tenha a sua recepção no controlador retardada. Já a ocorrência do atraso T_{CA} faz com que a ação de controle calculada pelo controlador não seja efetivamente realizada no atuador (no intervalo de amostragem correto). Por outro lado, a utilização de Sistemas de Controle via Redes possui uma série de vantagens tais como: possibilidade de distribuição do processamento e do controle de processos e sistemas de forma remota.

Neste capítulo, duas propostas de sistemas de controle via redes são apresentadas. A primeira proposta, denominada Sistema de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle para NCSs, foi desenvolvida para ser implementada em sistemas que não possuem informações sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle. Esta faz uso de um estimador para valores de saída da planta, em z , 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, para que possa ser feita uma correção adicional no sinal de entrada da planta.

A segunda proposta, denominada Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes, foi desenvolvida para ser implementada em sistemas nos quais as informações sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle estão disponíveis. Essa pro-

posta de controle utiliza módulos que são responsáveis por resolver questões problemáticas associadas aos NCSs. Para a questão da diferença de relógios entre os módulos foi implementada uma rotina de sincronização entre as máquinas local e remota e a questão da presença do atraso na medição (T_{SC}) e na atuação (T_{CA}) foi contornada com a utilização de um estimador para valores de saída da planta baseado em transformada δ , que utiliza além dos valores medidos para a saída da planta, valores estimados e medidos dos atrasos para otimização da estimação. A questão da precisão do modelo do estimador foi resolvida com a utilização de um estimador de parâmetros da planta, que utiliza a estrutura de MQR com Fatoração UD. O eventual problema da elevada relação entre o tempo morto e a contante de tempo da planta foi enfrentado com a utilização de controladores com a estrutura de preditor, o Preditor Smith. A situação de perda de link de Internet e provável perda de controle da malha foi avaliada com a utilização de um sistema preliminar de chaveamento entre os controladores Remoto e Local.

5 *Resultados Emulados e Experimentais*

5.1 Introdução

A utilização de sistemas de controle via redes traz uma série de vantagens em termos de flexibilidade e redução de custos. Por outro lado, a presença dos atrasos induzidos na rede tem o potencial de degradar o comportamento da planta em malha fechada.

Neste capítulo serão mostrados os efeitos práticos da presença dos atrasos induzidos pela rede em um sistema de controle. Foram realizadas implementações com a presença de um único tipo de atraso, ora T_{SC} e ora T_{CA} , e também com a presença concomitante dos dois atrasos.

Por meio da atenuação dos efeitos resultantes da presença dos atrasos e visando a melhoria da resposta dos sistemas de controle via redes, foram propostas duas técnicas de controle neste trabalho, conforme mostrado no Capítulo 4. Os resultados obtidos a partir da implementação destas técnicas propostas também são apresentados nas seções 5.4 e 5.5.

5.2 Comportamento dos Sistemas em função das Variações dos Atrasos nos NCS

O levantamento da resposta dos sistemas controlados via redes na presença de atrasos variáveis induzidos pela rede de comunicação de dados foi realizado na plataforma didática (seção 2.3.1) utilizando como planta, a Planta 1 (seção 2.2.1). Foram realizados testes com a presença isolada ora de atrasos T_{SC} , ora de atrasos T_{CA} e com a presença concomitante dos dois atrasos. Para controle dos sistemas foram utilizados os controladores PI em z e em Delta, apresentados nas seções 3.2.1 e 3.2.3, respectivamente. Para que seja estabelecida uma referência para a comparação entre as respostas, foi utilizado como setpoint o valor

de 10% para todo o experimento. Nas seções 5.2.1 a 5.2.6 serão apresentados os resultados típicos obtidos em algumas seções de testes em malha fechada, cada teste foi realizado no mínimo três vezes.

5.2.1 Efeitos isolados dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por tempo

O comportamento de um NCS, em malha fechada, sujeito apenas a um tipo de atraso é avaliado neste experimento. São testadas duas configurações, uma contendo apenas os atrasos T_{SC} e outra contendo apenas os atrasos T_{CA} . Essas duas condições são equivalentes às topologias (a) e (b) mostradas na Figura 1.4, respectivamente.

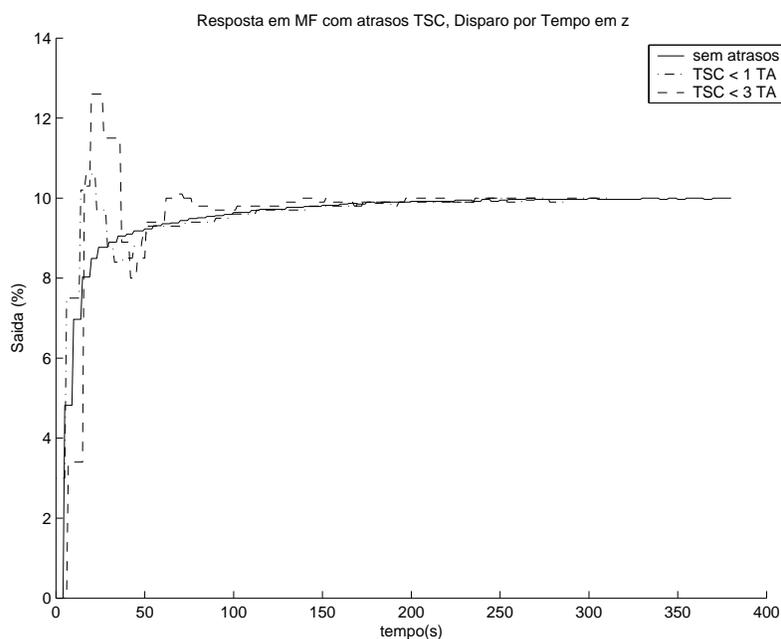


Figura 5.1: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} , controlador em z disparado por tempo

As figuras 5.1 e 5.2 ilustram o comportamento da planta (sinal de saída percentual), em malha fechada, sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} , respectivamente, em comparação com a planta sem atraso. Na planta utilizada no experimento, a escala percentual adotada para a representação dos sinais de entrada, de saída e de setpoint, garante que, de 0 a 100%, toda faixa operacional da planta é representada. Esta escala foi adotada visando à simplificação, à padronização e um melhor condicionamento numérico do algoritmo de controle e dos conversores A/D e D/A.

Na resposta mostrada na Figura 5.1 observa-se que o sistema apresenta oscilação e

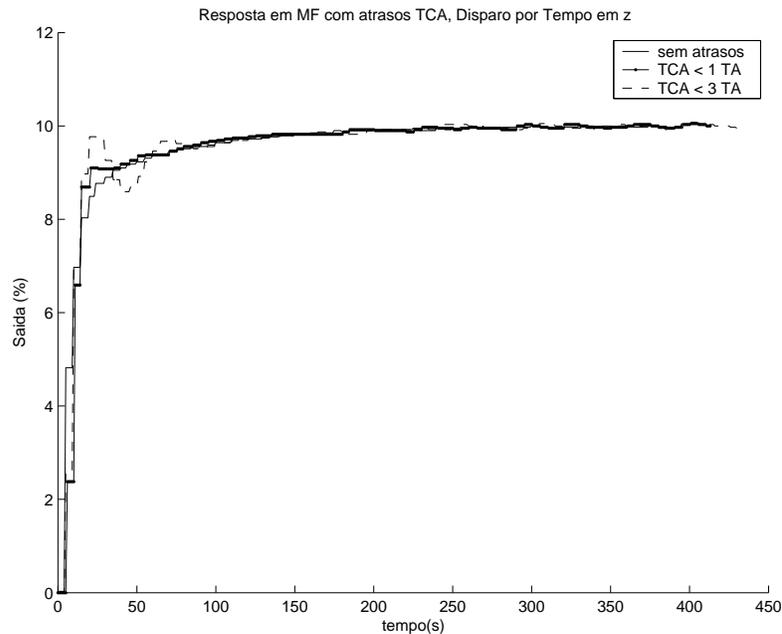


Figura 5.2: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{CA} , controlador em z disparado por tempo

sobressinal no período transitório. Estes fenômenos são mais acentuados com o aumento do valor do atraso T_{SC} . O sobressinal alcançou o valor de 5% para T_{SC} inferiores a um período de amostragem e 26% para T_{SC} inferiores a três períodos de amostragem.

Na Figura 5.2 observa-se também, oscilação no regime transitório. A oscilação aumenta com o incremento de T_{CA} , mas não produz sobressinal no sistema.

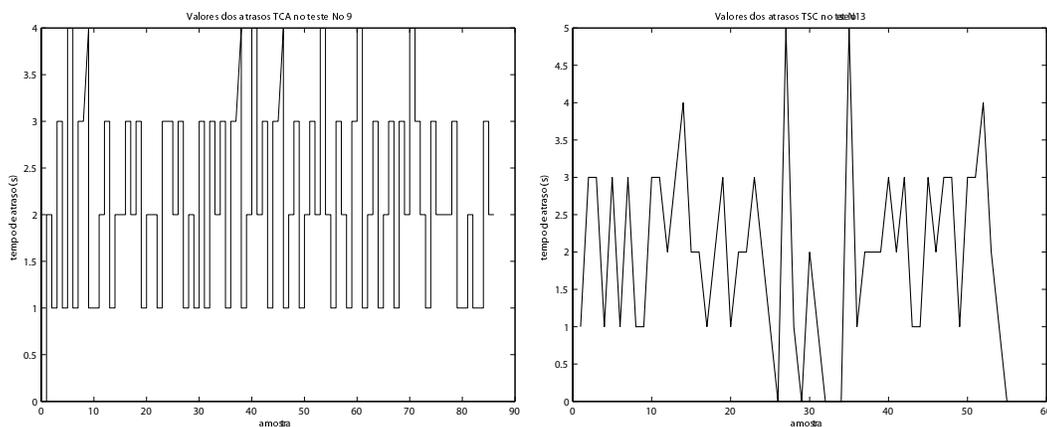


Figura 5.3: Exemplos de seqüências de atrasos inferiores a um período de amostragem, que foram aplicados ao NCS

A Figura 5.3 mostra, como exemplo, duas seqüências de atrasos inferiores a um período de amostragem, que foram aplicados ao NCS.

5.2.2 Efeitos dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por tempo

Nesta implementação, o sistema foi submetido a atrasos de transmissão no envio do sinal do sensor ao controlador T_{SC} e do controlador ao atuador T_{CA} , de forma concomitante.

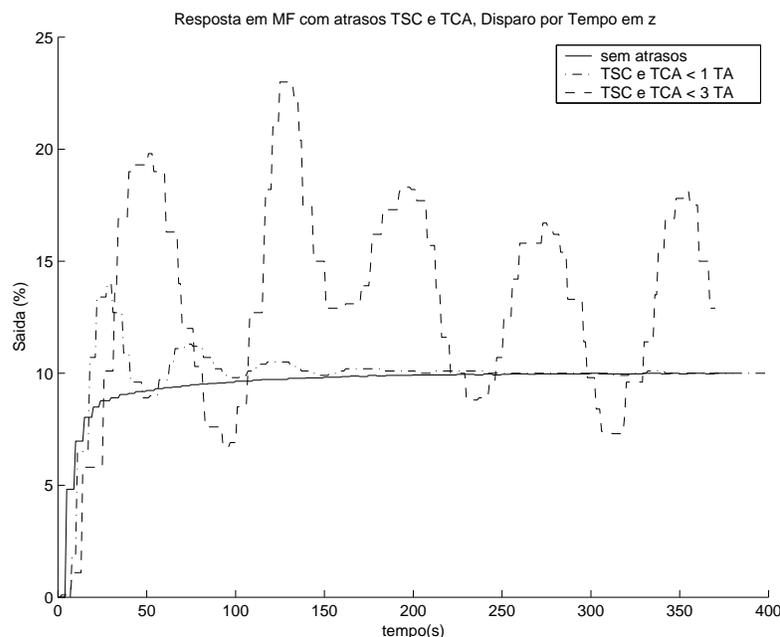


Figura 5.4: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} e T_{CA} , com controlador em z disparado por tempo

A Figura 5.4 ilustra o comportamento da saída da planta, em malha fechada, sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} em comparação com a planta sem atraso. Para atrasos inferiores a um período de amostragem observa-se um pequeno sobressinal no sistema, da ordem de 5%, aparecimento de oscilação em regime transitório e o aumento no tempo de estabilização. Para atrasos inferiores a três períodos de amostragem, o sistema apresenta sobressinais de valores muito elevados, superiores a 130%, sem conseguir estabilizar a saída da planta no intervalo de avaliado.

A Figura 5.5 mostra, como exemplo, duas sequências de atrasos inferiores a três períodos de amostragem, que foram aplicados ao NCS.

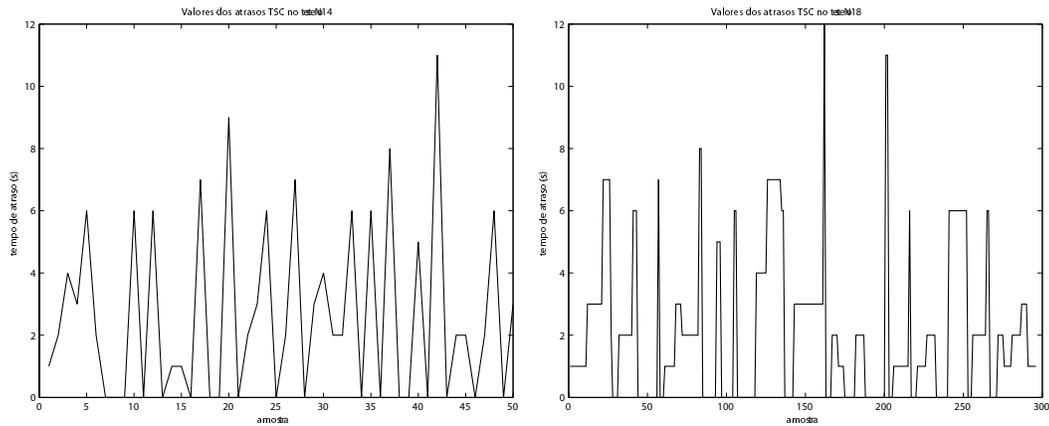


Figura 5.5: Exemplos de seqüências de atrasos inferiores a três períodos de amostragem, que foram aplicados ao NCS

5.2.3 Efeitos isolados dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por evento

O comportamento de um NCS tendo o controlador com período de amostragem irregular e sujeito apenas a um tipo de atraso é avaliado neste experimento. O algoritmo de controle é disparado por evento, executado apenas quando uma nova medida chega ao controlador. São testadas duas configurações, uma contendo apenas os atrasos T_{SC} e outra contendo apenas os atrasos T_{CA} .

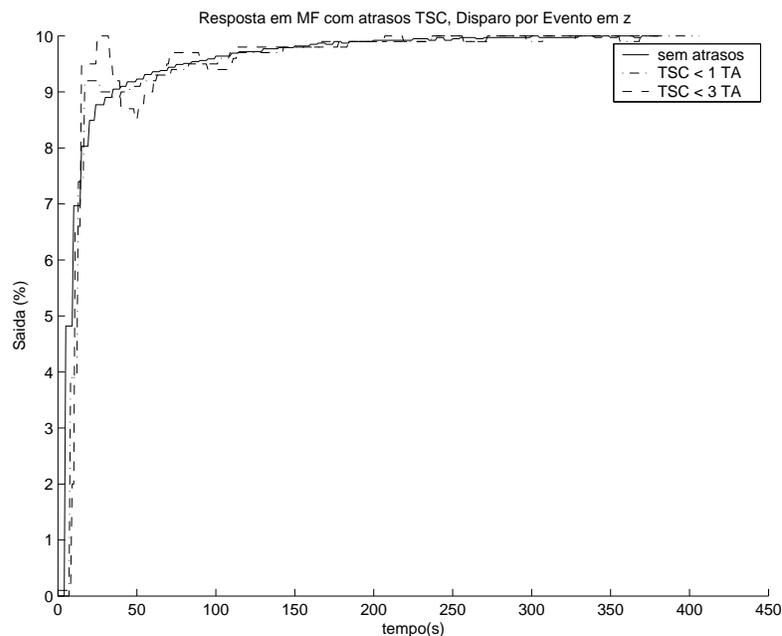


Figura 5.6: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} , controlador z disparado por evento em

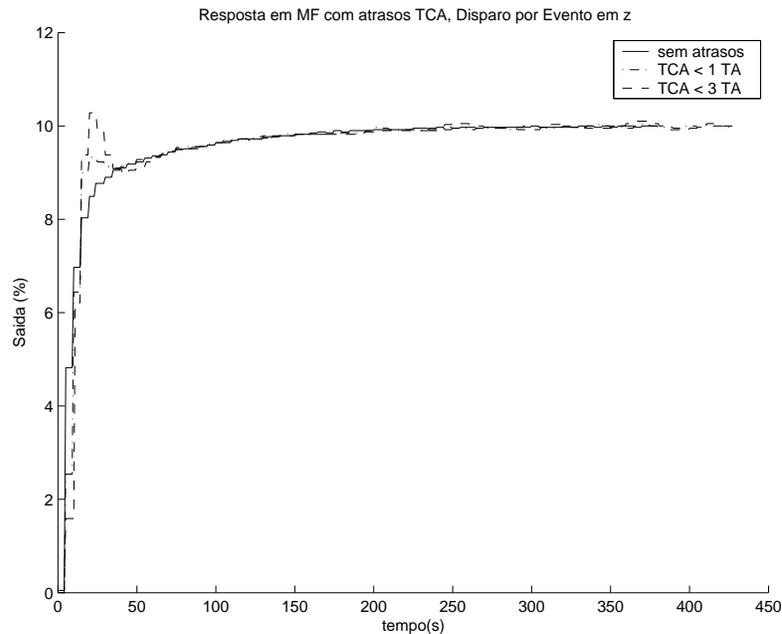


Figura 5.7: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{CA} , controlador disparado por evento em z

Na resposta apresentada na Figura 5.6, observa-se oscilação no período transitório, mas sem a presença de sobressinal. O fenômeno oscilatório é mais acentuado com o aumento do valor do atraso T_{SC} .

Na Figura 5.7 observa-se, também, oscilação no regime transitório, de menor intensidade que na situação anterior (figura 5.6). Observa-se que a oscilação aumenta com o incremento de T_{CA} , chegando a produzir sobressinal no sistema, da ordem de 4%, para atrasos T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem.

5.2.4 Efeitos dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em z com disparo por evento

O comportamento de um NCS tendo o controlador com período de amostragem irregular e sujeito aos atrasos T_{SC} e T_{CA} de maneira concomitante é avaliado neste experimento.

A Figura 5.8 mostra o comportamento da saída da planta, em malha fechada, sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} em comparação com a planta sem atraso. Para atrasos inferiores a um período de amostragem, observa-se um pequeno sobressinal no sistema, da ordem de 4%, aparecimento de oscilação em regime transitório e pequeno aumento no tempo de estabilização. Para atrasos inferiores a três períodos de amostragem, o sistema apresenta sobressinais de valores muito elevados, superiores a 50%, sem conseguir alcançar

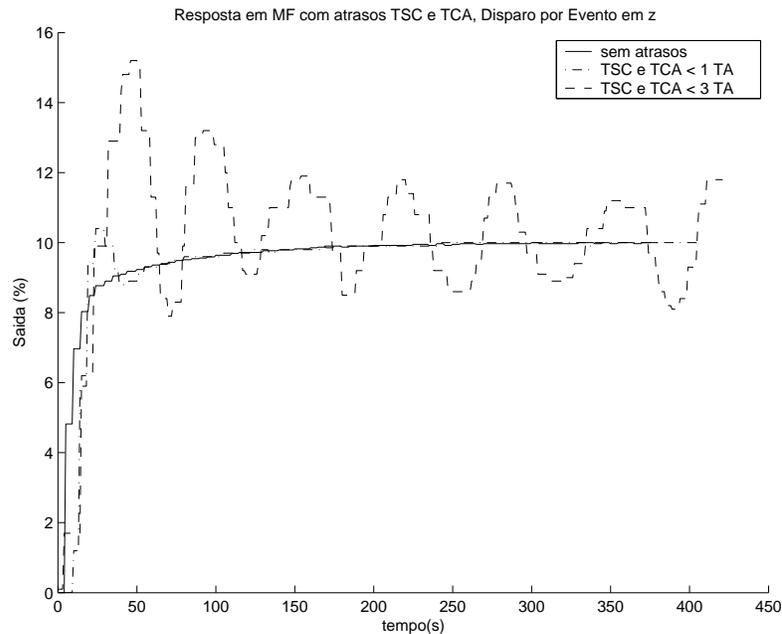


Figura 5.8: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} e T_{CA} , com controlador disparado por evento em z

estabilidade durante o período avaliado.

5.2.5 Efeitos isolados dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em Delta com disparo por evento

O comportamento de um NCS tendo o controlador com período de amostragem irregular e sujeito apenas a um tipo de atraso é avaliado neste experimento. O algoritmo de controle é disparado por evento, executado apenas quando uma nova medida chega ao controlador e utiliza a equação de diferenças em Delta. O valor do atraso T_{CA} faz parte da equação de controle, conforme mostrado na seção 3.2.3. São avaliadas duas configurações, uma contendo apenas os atrasos T_{SC} e outra contendo apenas os atrasos T_{CA} .

Na resposta apresentada na Figura 5.9, observa-se uma reduzida oscilação no período transitório, sem a presença de sobressinal, para atrasos inferiores a um período de amostragem. O fenômeno oscilatório é acentuado com o aumento do valor do atraso T_{SC} e um sobressinal da ordem de 4% surge no sistema para atrasos inferiores a três períodos de amostragem.

Para a presença de atrasos T_{CA} , os resultados obtidos foram semelhantes aos da implementação que utiliza o controlador em z disparado por tempo, nas mesmas condições de atrasos.

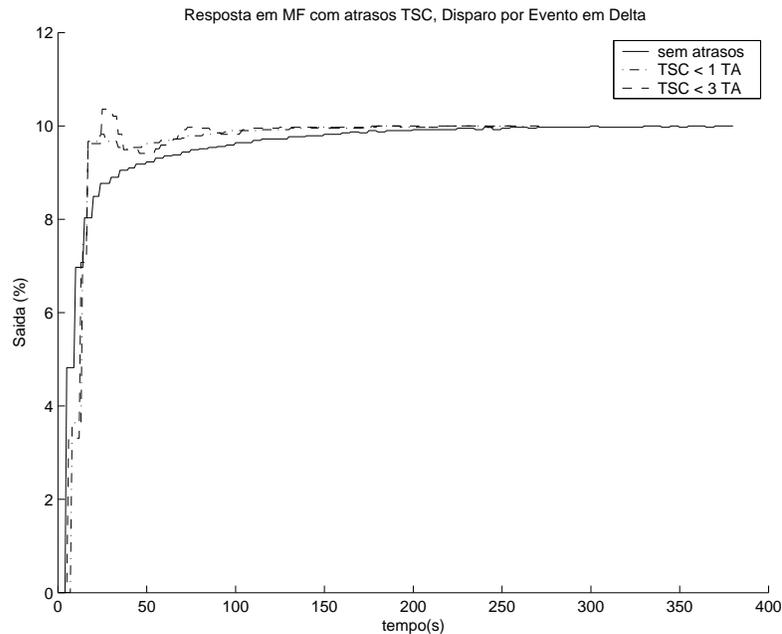


Figura 5.9: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} , controlador disparado por evento em delta

5.2.6 Efeitos dos atrasos T_{SC} e T_{CA} - Controlador em Delta com disparo por evento

O comportamento de um NCS tendo o controlador com período de amostragem irregular e sujeito aos atrasos T_{SC} e T_{CA} com algoritmo de controle que utiliza a equação de diferenças em Delta e disparado por evento é avaliado neste experimento.

A Figura 5.10 mostra o comportamento da saída da planta, em malha fechada, sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} em comparação com a planta sem atraso. Para atrasos inferiores a um período de amostragem, observa-se uma pequena oscilação em regime transitório, sem alteração no tempo de estabilização. Para atrasos inferiores a três períodos de amostragem, o sistema apresenta sobressinais da ordem de 19% e passa a ter oscilação. Entretanto, diferentemente das outras duas implementações de controladores, esta implementação conseguiu estabilizar o sistema para atrasos inferiores a três períodos de amostragem, demonstrando maior capacidade de manutenção do desempenho diante da condição mais severa de operação.

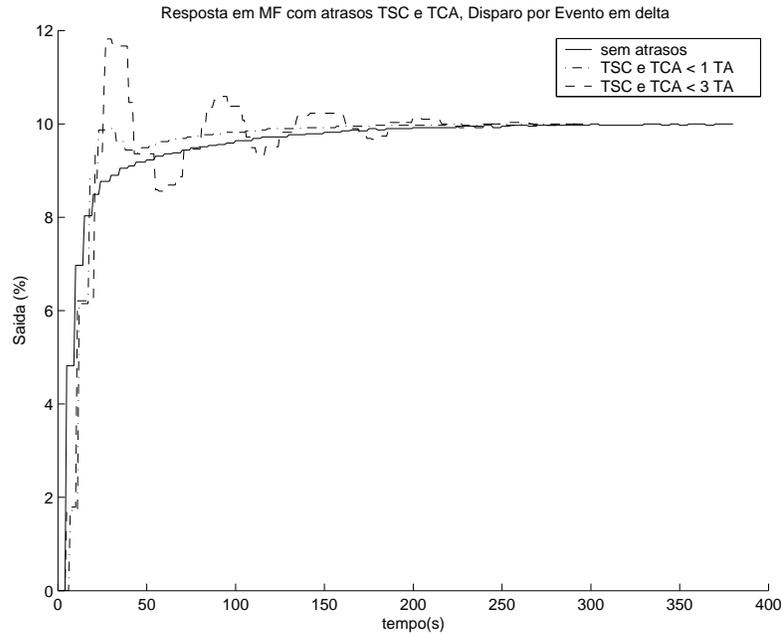


Figura 5.10: Superposição da resposta sem atrasos às respostas em MF com atrasos T_{SC} e T_{CA} , com controlador em Delta disparado por evento

5.3 Comportamento dos Sistemas em função das Variações dos Atrasos na Plataforma NCS-CMUF

A fim de se verificar o comportamento dos NCSs em várias configurações de redes, a plataforma NCS-CMUF foi implementada nas três arquiteturas descritas nas seções 2.3.2 a 2.3.2. Como plantas, foram utilizadas as Plantas 1 e 2 (seções 2.2.1 e 2.2.2). Para o controle da Planta 1 foi utilizado o controlador PI, discretizado em z , com um período de amostragem de 5 segundos, conforme mostrado na seção 3.2.1. Para o controle da Planta 2 foi utilizado o controlador PI, discretizado em z , com um período de amostragem de 125 milissegundos e 150 milissegundos, conforme mostrado na seção 3.2.2.

5.3.1 NCS Local - Controlador na Rede CAN

Seja a plataforma NCS-CMUF, com controle local, descrita na seção 2.3.2. A Figura 5.11 mostra a sequência de mensagens que trafegam na rede CAN durante um ciclo completo de controle. A mensagem número 1 representa o comando de sincronização produzida pelo *gateway*; a mensagem número 2 é a mensagem com o valor da medida gerada pelo nó sensor; a mensagem número 3 é a mensagem de resposta do nó controlador com o valor da ação de controle a ser implementada e a mensagem número 4 é o sinal de efetivação da ação de controle recebida (*acknowledgment*) pelo nó atuador.

Nesta estrutura de NCS, o atraso global ($T_{SC} + T_{CA}$) foi da ordem de 13 ms. Este valor de atraso é constante para a rede CAN e, neste caso, pode-se considerar o NCS como um sistema determinístico (LIAN, 2001). Projetos de NCS nesta estrutura apresentam um grau de complexidade menor, uma vez que o caráter determinístico do atraso permite separar claramente os atrasos pré (T_{SC}) e pós (T_{CA}) controlador, de forma que estes valores podem ser integrados ou compensados no algoritmo de controle ao se utilizar um controlador do tipo “disparado por tempo”.

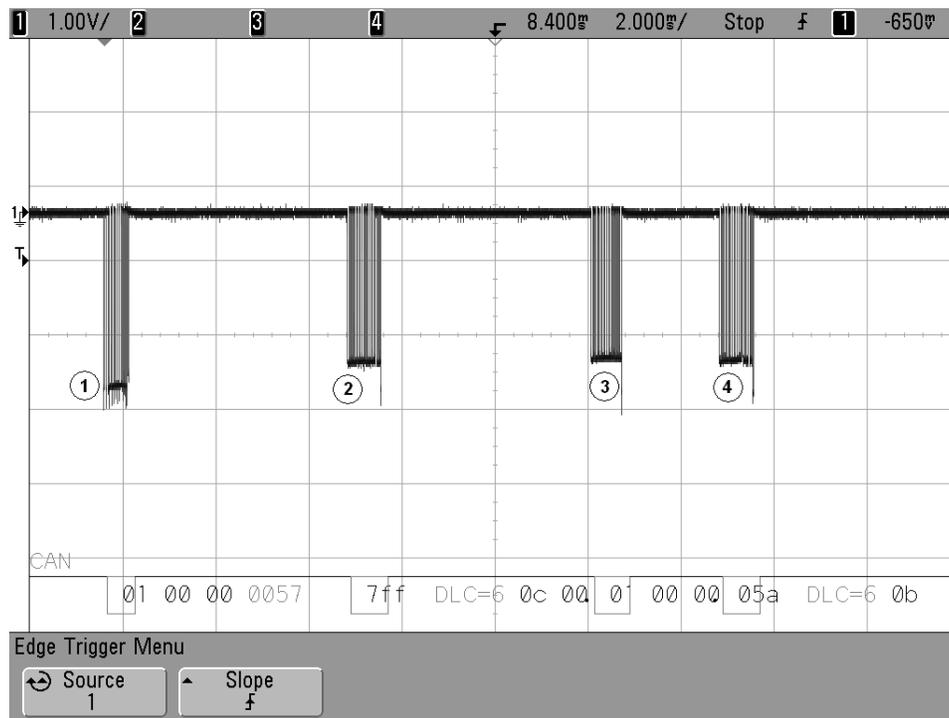


Figura 5.11: Sequência de mensagens na rede CAN referente a um ciclo de controle na plataforma NCS-CMUF, com controle local

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram o comportamento da saída das plantas 1 e 2, em malha fechada e sujeitas aos atrasos T_{SC} e T_{CA} provocados pela rede CAN, em comparação com a saída da planta numa configuração digital convencional (sem atrasos de medição e atuação). Sendo o atraso global da ordem de 13 ms, a relação atrasos/tempo de amostragem é extremamente reduzida nas duas plantas. Na planta 1, essa relação é de 0,003, para um período de amostragem de 5 segundos. Na implementação com a planta 2 foi utilizado o período de amostragem de 150 ms, desta forma, a relação atrasos/tempo de amostragem é de 0,087. Assim, a resposta do sistema, usando NCS, foi muito próxima da resposta do sistema usando controle convencional.

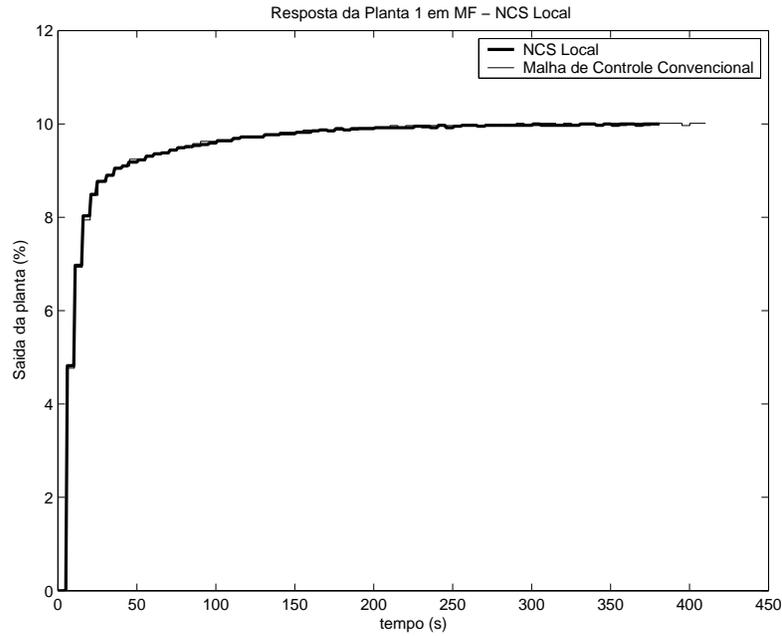


Figura 5.12: Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle local

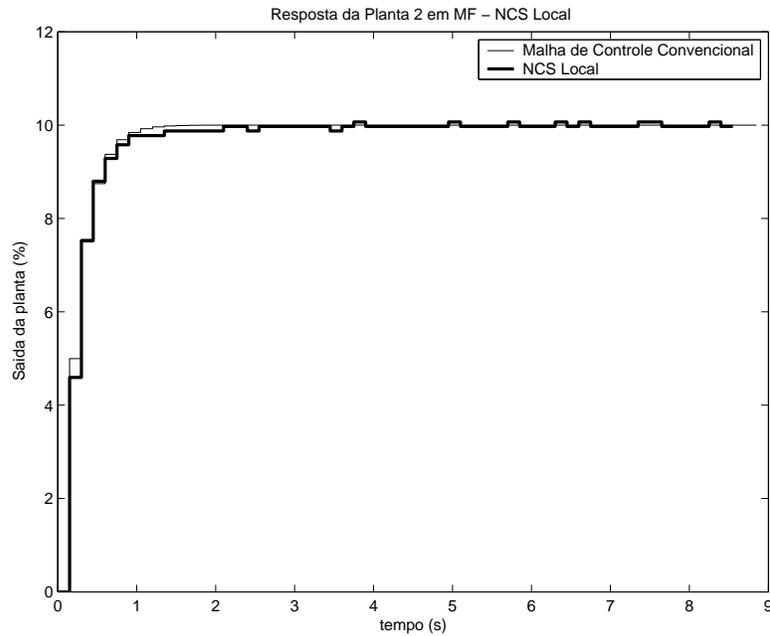


Figura 5.13: Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle local

5.3.2 NCS Remoto via Porta Serial - Controlador no *webserver*

Nesta implementação, a plataforma NCS-CMUF possui como nó controlador o *webserver*, que é conectado ao nível da rede CAN, por meio do *gateway*, via porta serial

padrão RS-232, conforme descrito na seção 2.3.2.

A Figura 5.14 mostra a seqüência de mensagens que trafegam nas redes CAN e RS-232 durante um ciclo completo de controle na plataforma NCS-CMUF, com controle serial . A mensagem de número 1 representa o comando de sincronização produzida pelo *gateway* na rede CAN; a número 2 é a mensagem com o valor da medida gerada pelo nó sensor e enviada à placa *gateway*, via rede CAN; a número 3 é a mesma mensagem com o valor da medida transmitida do *gateway* para o *webserver*, via RS-232; a mensagem 4 é a resposta do controlador com o valor da ação de controle a ser implementada, transferida para o *gateway* via RS-232; a mensagem 5 também contém o valor da ação de controle a ser implementada, transferida do *gateway* para o nó atuador, via CAN e a mensagem de número 6 é o sinal de efetivação da ação de controle recebida, *Ack (Acknowledgment)*, pelo nó atuador. O atraso global, neste arranjo, é da ordem de 170 ms.

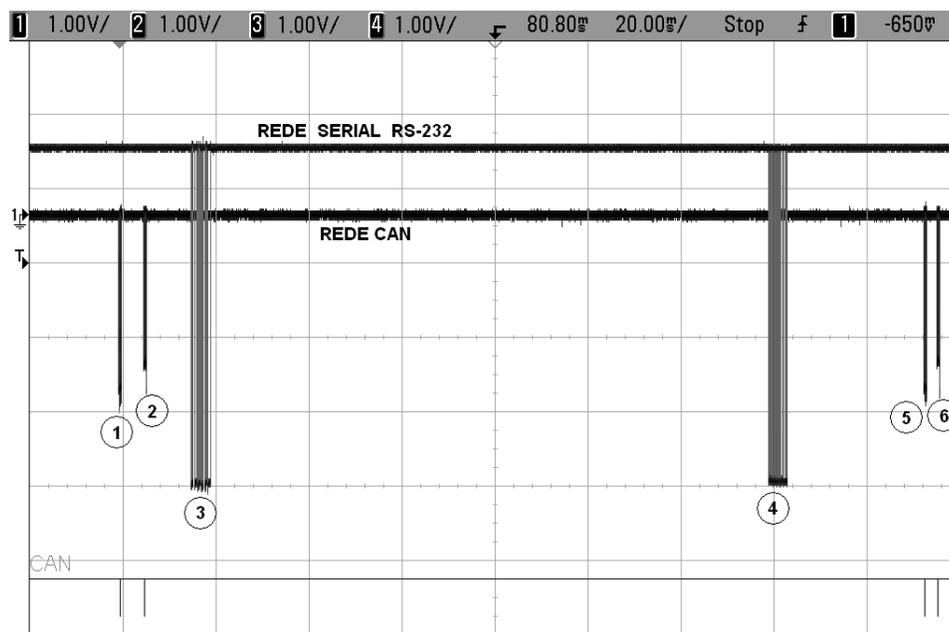


Figura 5.14: Sequência de mensagens nas redes CAN e RS-232 referentes a um ciclo de controle

As Figuras 5.15 e 5.16 ilustram o comportamento da saída das plantas 1 e 2, em malha fechada, sujeitas aos atrasos T_{SC} e T_{CA} , provocados pelas redes CAN e RS-232, em comparação com a saída da planta numa configuração digital convencional. Nesta configuração, mais uma vez a relação atrasos/tempo de amostragem apresentou valor reduzido (em torno de 0,03) para a planta 1 e a resposta do sistema com NCS foi pouco afetada em comparação com o sistema usando controle convencional. Para a planta 2, que possui amostragem de 150 ms, a relação atrasos/tempo de amostragem foi em torno

de 1 e a resposta do sistema usando NCS sofreu grande alteração em função dos atrasos provocados pela rede. O sistema passou a apresentar sobressinal da ordem de 30%, o tempo de acomodação elevou-se de 1,5 para 6 s e a saída passou a apresentar uma pequena oscilação em torno do setpoint. Este teste comprova novamente que atrasos globais da mesma ordem de grandeza do período de amostragem já são suficiente para degradação da qualidade da resposta dos NCSs.

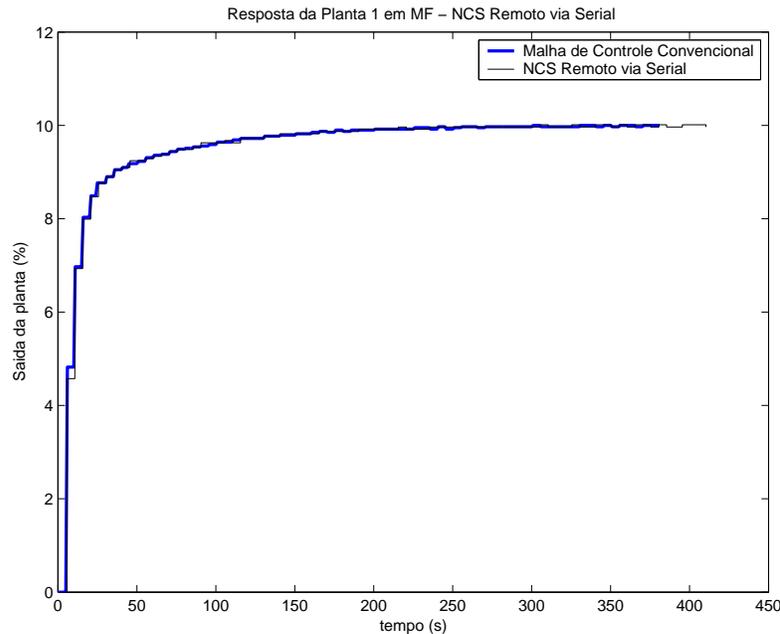


Figura 5.15: Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle via porta serial

5.3.3 NCS Remoto via Internet - Controlador no PC ligado à Internet por TCP/IP

Nesta implementação, o NCS possui três níveis de rede. Em relação à estrutura de NCS Remoto via Porta Serial, o controlador foi deslocado do *webserver* para um outro nó (que é um computador) conectado à Internet. O *webserver* passa a desempenhar um papel semelhante ao da placa *gateway*, fazendo a interface entre a rede RS-232 e a Internet.

As implementações via Internet realizadas na plataforma NCS-CMUF com a Planta 1 utilizaram um período de amostragem de 5 segundos. Para a Planta 2, o período de amostragem utilizado foi de 125 milissegundos.

A Figura 5.17 mostra a sequência de mensagens que trafegam nas redes CAN, RS-232 e Internet durante um ciclo completo de controle. As mensagens na Internet não

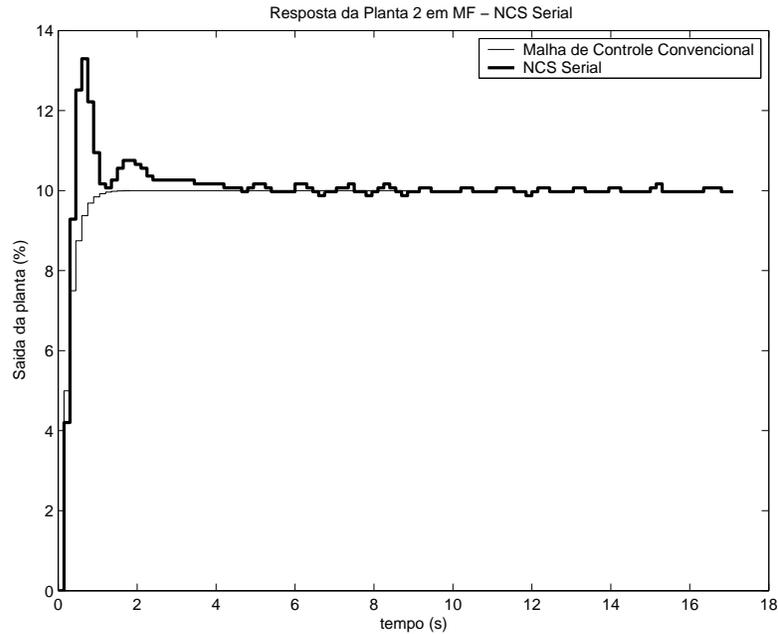


Figura 5.16: Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle via porta serial

foram medidas e a representação dessas mensagens na Figura visa apenas mostrar a sequência de acontecimento e não tem precisão de tempo. A mensagem de número 1 representa o comando de sincronização produzida pelo *gateway* na rede CAN; a número 2 é a mensagem com o valor da medida gerada pelo nó sensor e enviada à placa *gateway*, via rede CAN. Esta mensagem é transmitida do *gateway* para o *webserver* (mensagem número 3), via RS-232. O *webserver* envia esta mensagem ao computador remoto por meio de um *socket* TCP/IP, numa conexão pela Internet (mensagem número 4). Ao receber a mensagem contendo o valor da medida, o computador remoto executa o algoritmo de controle (disparo por evento) e envia uma mensagem, contendo o valor da ação de controle a ser implementada pelo atuador. Essa mensagem é encaminhada para o *webserver* via Internet (mensagem número 5); o *webserver*, por sua vez, transfere a mensagem para o *gateway*, via RS-232 (mensagem número 6). A mensagem 7 contém o valor da ação de controle a ser implementada, transferida do *gateway* para o nó atuador, na rede CAN. A mensagem de número 8 é o sinal de efetivação da ação de controle recebida (*Ack*) pelo nó atuador. As mensagens 9 e 10 representam, respectivamente, o envio do *Ack* pela rede RS-232 e pela Internet ao computador remoto (controlador).

Foram avaliadas três situações operacionais para a implantação de um NCS remoto via Internet:

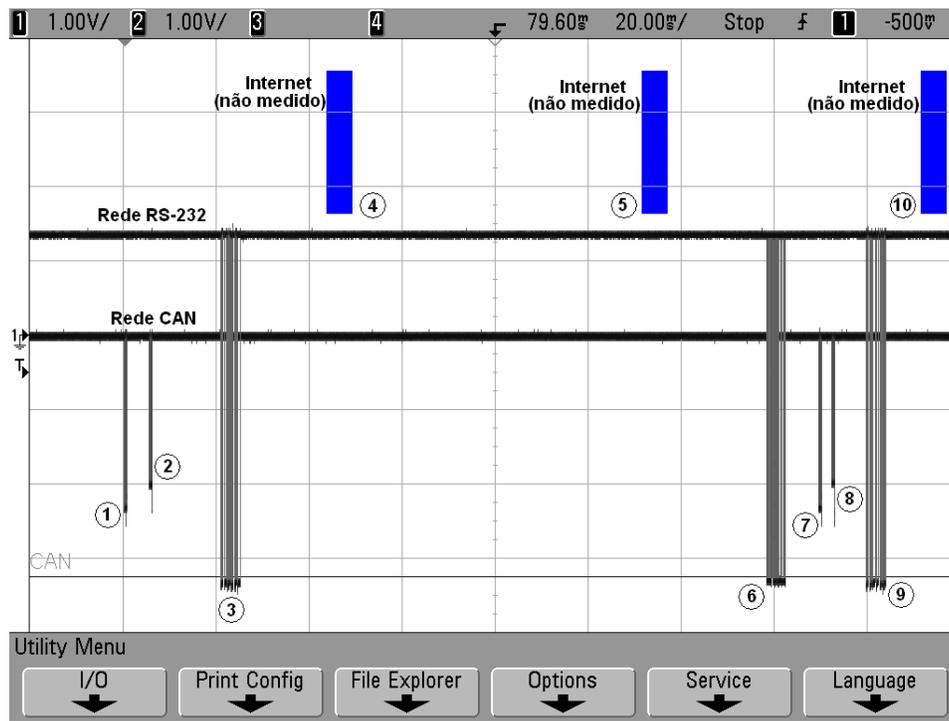


Figura 5.17: Sequência de mensagens nas redes CAN, RS-232 e Internet, referentes a um ciclo de controle

a) Webserver e computador ligados ao mesmo roteador de Internet

Nessa implementação, o nó controlador (computador) e o *webserver* estão conectados ao mesmo roteador, estão na mesma rede local (LAN) e possuem o mesmo endereço de *Gateway*, de forma que o trajeto de Internet é o menor possível e se restringe aos limites do Laboratório de Controle de Processos da UFMG (LCPI-UFMG).

A Figura 5.18 mostra os valores do atraso global em cada intervalo de amostragem, para o sistema em teste. Observa-se que o atraso possui um perfil aleatório mas apresenta uma valor médio bem definido.

A Figura 5.19 ilustra o comportamento da saída da planta 1, em malha fechada, sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} , provocados pelas redes CAN, RS-232 e Internet, em comparação com a planta sem atraso. Considerando um atraso global médio, em torno de 190 ms, conforme mostrado na Figura 5.18, novamente a relação atrasos/tempo de amostragem apresentou valor reduzido (em torno de 0,04) e a resposta do sistema usando NCS foi pouco afetada em comparação com o sistema usando controle convencional.

A Figura 5.20 ilustra o comportamento da saída da planta 2 sob as mesmas condições do teste anterior, que foi feito com a planta 1. Com a presença de atrasos globais sempre superiores a um intervalo de amostragem, a resposta da planta sofreu forte degradação,

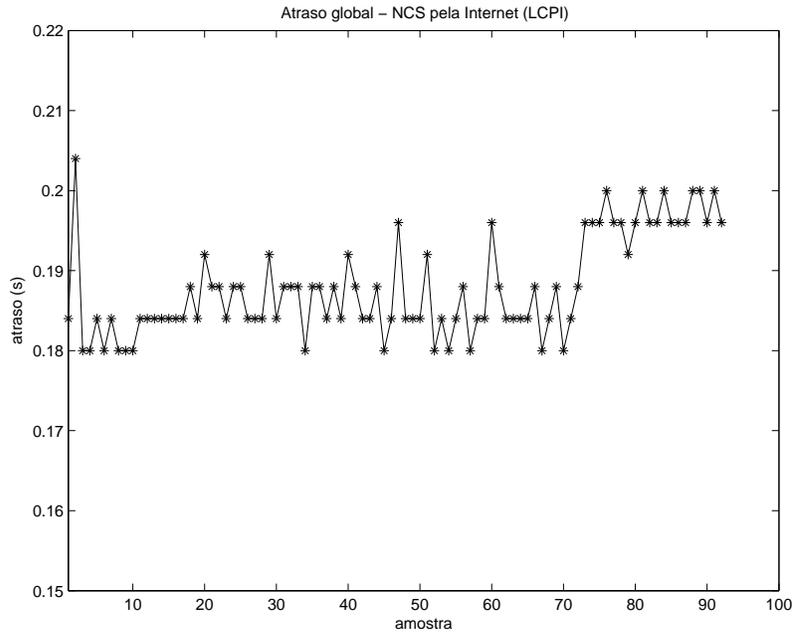


Figura 5.18: Valores dos atrasos globais na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (LCPI)

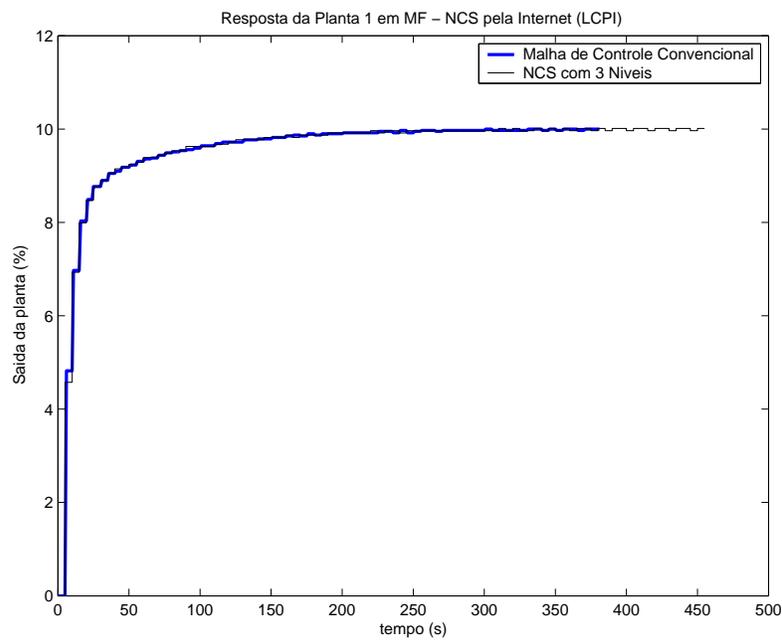


Figura 5.19: Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (LCPI)

apresentando sobressinal da ordem de 80%, aumento do tempo de acomodação e oscilação em torno do setpoint após o período transitório.

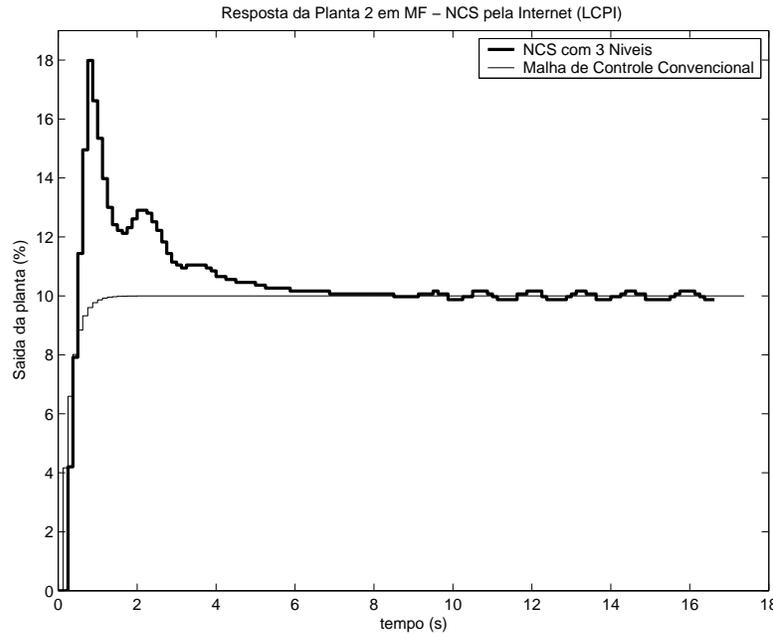


Figura 5.20: Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (LCPI)

b) Computador conectado por link sem fio a um roteador de Internet diferente do webserver

Neste arranjo, o computador (nó controlador) e o *webserver* estão conectados a sub-redes diferentes: o *webserver* conectado ao roteador do LCPI (IP: XXX.XXX.32.XXX) e o computador conectado à uma outra sub-rede (IP: XXX.XXX.35.XXX), denominada WIRELESS-CPDEE, por meio de um link sem fio.

A Figura 5.21 mostra os valores do atraso global em cada intervalo de amostragem, para o sistema em teste. Novamente observa-se o perfil aleatório dos atrasos.

As Figuras 5.22 e 5.23 ilustram o comportamento da saída das plantas 1 e 2, respectivamente, em malha fechada sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} , provocados pelas redes CAN, RS-232 e Internet, em comparação com a planta sem atraso. Considerando um atraso global médio, em torno de 320 ms, conforme mostrado na Figura 5.21, novamente a relação atrasos/tempo de amostragem apresentou valor reduzido (em torno de 0,06) para a planta 1 e a resposta do sistema usando NCS ainda foi pouco afetada em comparação com o sistema usando controle convencional. Com a presença de atrasos globais sempre superiores a um intervalo de amostragem, a resposta da planta 2 (Figura 5.23) sofreu forte degradação, apresentando sobressinal da ordem de 90%, aumento do tempo de acomodação e oscilação em torno do setpoint após o período transitório.

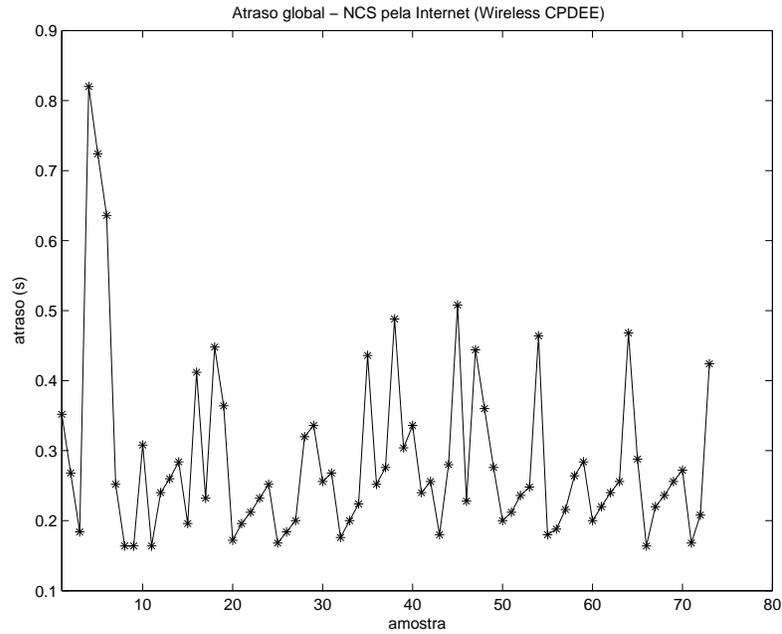


Figura 5.21: Valores dos atrasos globais na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Wireless CPDEE)

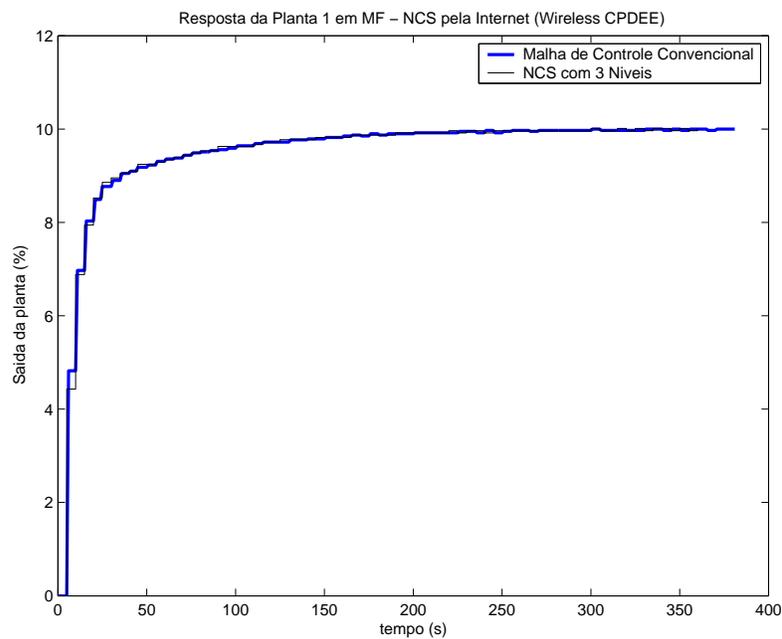


Figura 5.22: Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Wireless CPDEE)

c) Computador conectado à Internet por linha discada

Para essa seção de teste, o computador (nó controlador) e o *webserver* estão conectados a redes diferentes: o *webserver* conectado ao roteador do LCPI e o computador

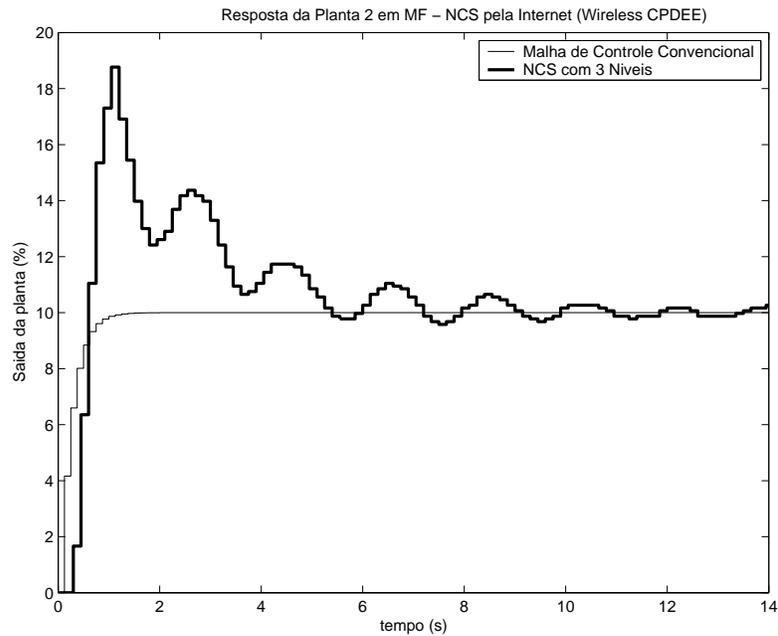


Figura 5.23: Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Wireless CPDEE)

conectado a uma outra rede por meio de um acesso via linha telefônica comum (acesso discado). A rota percorrida pelos pacotes computador \rightarrow *webserver* é descrita abaixo:

1. *TCHIPTBHE01.acesonet.com.br* [200.191.21.56]
2. *C2501TBHE01.acesonet.com.br* [200.191.21.49]
3. *ebt-C2-dist05.bhe.embratel.net.br* [200.244.164.139]
4. *ebt-P13-1-core03.spo.embratel.net.br* [200.244.140.246]
5. *ebt-C1-gacc01.spo.embratel.net.br* [200.230.242.10]
6. *peer-A4-0-58-gacc02.spo.embratel.net.br* [200.211.38.150]
7. *200.143.253.122*
8. *so-0-2-0-r1-df.bkb.rnp.br* [200.143.252.17]
9. *so-0-1-0-r1-mg.bkb.rnp.br* [200.143.252.29]
10. *s2-mg.bkb.rnp.br* [200.143.252.226]
11. *pop-mg-novo.rede.ufmg.br* [200.131.2.220]

12. *pop.central-core.rede.ufmg.br* [150.164.164.149]

13. *engenharia2-rt.rede.ufmg.br* [150.164.164.85]

14. *labfjota11.cpdee.ufmg.br* [150.164.XXX.XXX]

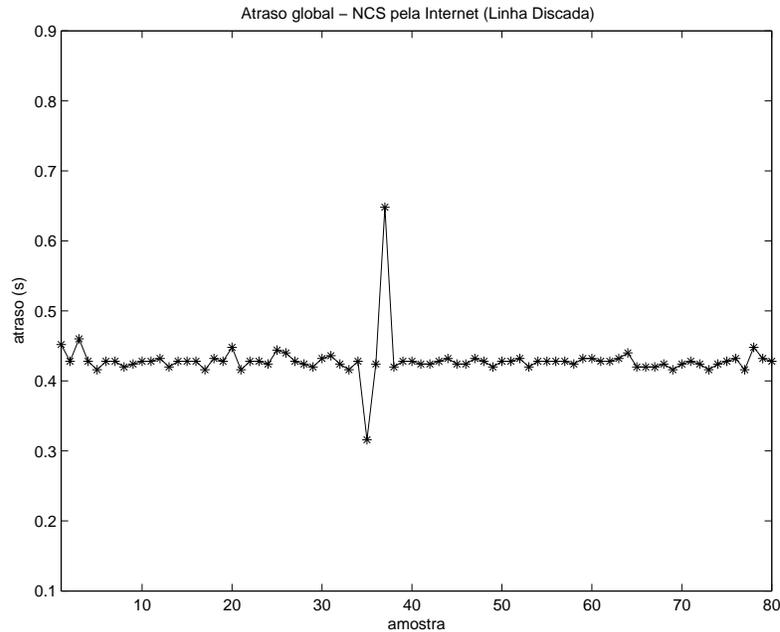


Figura 5.24: Valores dos atrasos globais na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Linha Discada)

A Figura 5.24 mostra os valores do atraso global em cada intervalo de amostragem, para o sistema em teste. Observa-se novamente o perfil aleatório dos atrasos e um valor médio bem definido.

As Figuras 5.25 e 5.26 ilustram o comportamento da saída da planta 1 e 2, respectivamente, em malha fechada sujeita aos atrasos T_{SC} e T_{CA} , provocados pelas redes CAN, RS-232 e Internet, em comparação com a planta sem atraso. Considerando um atraso global médio, em torno de 430 ms, conforme mostrado na Figura 5.24, novamente a relação atrasos/tempo de amostragem apresentou valor reduzido (em torno de 0,09) para a planta 1 e a resposta do sistema usando NCS novamente foi pouco afetada em comparação com o sistema usando controle convencional. Para a planta 2 (Figura 5.26), a presença de atrasos globais sempre superiores a dois intervalos de amostragem ($T_{GL} > 2T_a$), a saída da planta sofreu forte degradação, apresentando sobressinal da ordem de 70%, aumento do tempo de acomodação e oscilação em torno do setpoint após o período transitório.

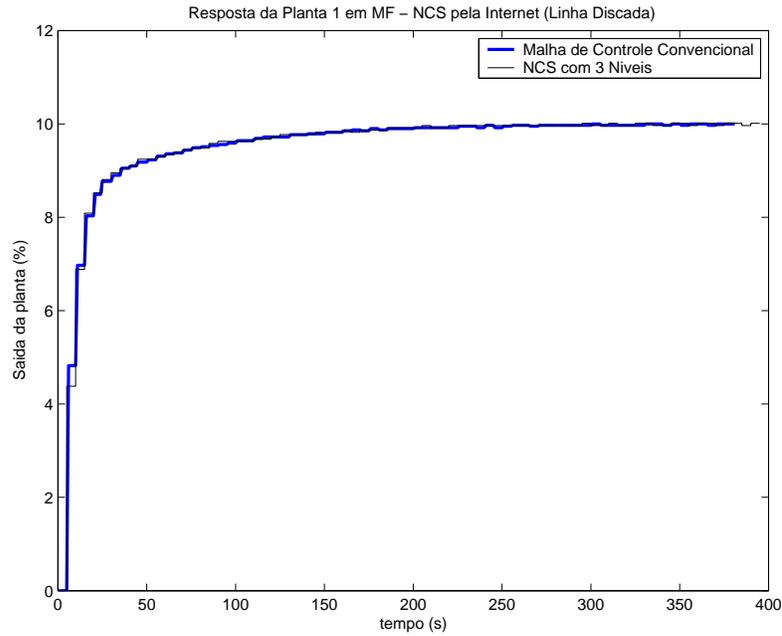


Figura 5.25: Comportamento da saída da planta 1 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Linha Discada)

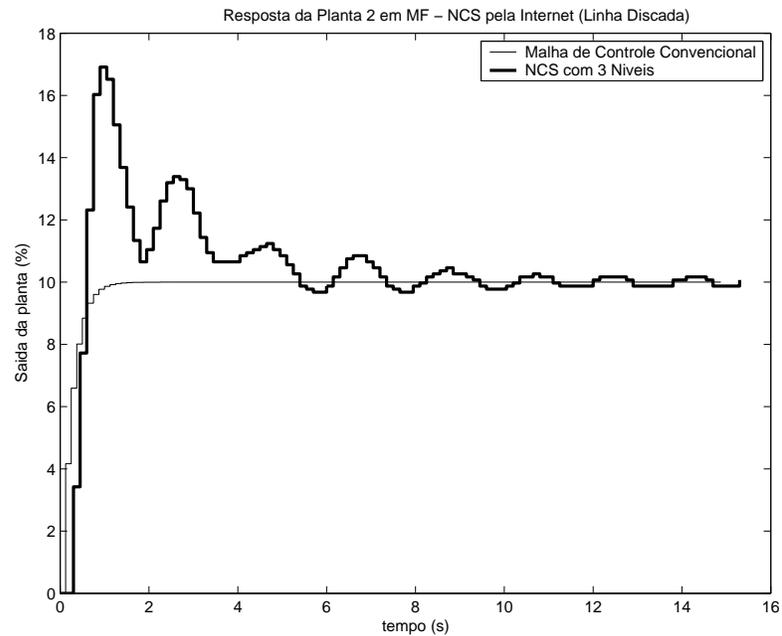


Figura 5.26: Comportamento da saída da planta 2 na plataforma NCS-CMUF com controle pela Internet (Linha Discada)

5.4 Sistema de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle para NCSs

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio da implementação do sistema de controle com compensação explícita do sinal de controle, apresentado na seção

4.2. Duas implementações foram realizadas: a primeira com a presença de atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a um período de amostragem e a segunda com a presença de atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem. Pelo menos duas seções de testes foram realizadas para cada configuração. Os resultados são apresentados nas seções 5.4.1 e 5.4.2.

5.4.1 Implementação do Sistema de Controle na Presença de Atrasos $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$

Nesta implementação, os atrasos T_{SC} e T_{CA} foram adicionados no sistema e mantidos a valores inferiores a um intervalo de amostragem, ou seja, $0 \leq T_{SC} \leq 5$ s e $0 \leq T_{CA} \leq 5$ s. A Figura 5.27 mostra os valores dos atrasos nesta etapa do experimento. A Figura 5.28 mostra o comportamento da saída da planta em malha fechada com a presença destes atrasos, para condição inicial nula e setpoint igual a 10%.

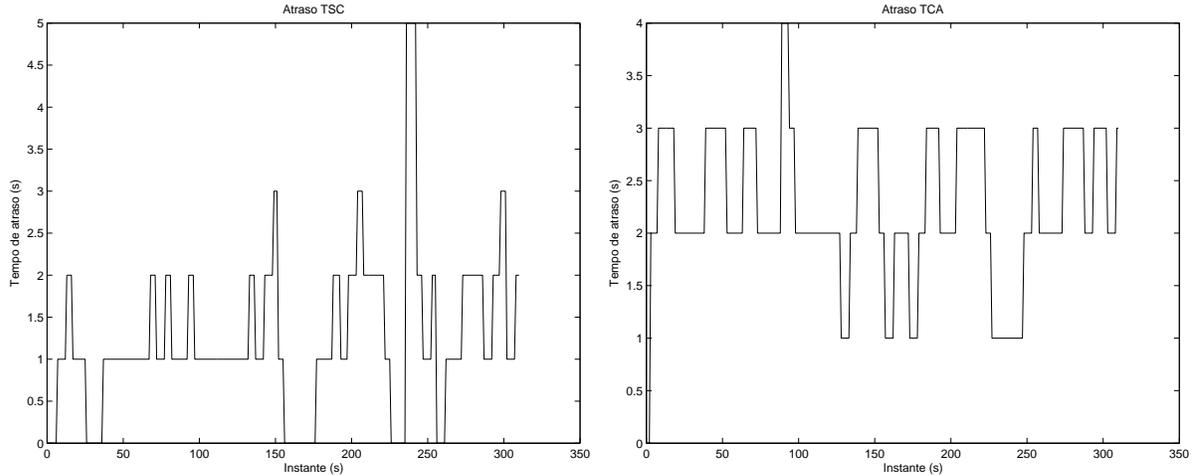


Figura 5.27: Valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} para $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$

5.4.2 Implementação do Sistema de Controle na Presença de Atrasos T_{SC} e T_{CA} Inferiores a $3Ta$

Nesta implementação, os atrasos T_{SC} e T_{CA} foram adicionados no sistema podendo assumir quaisquer valores entre 0 e 3 períodos de amostragem, ou seja, $0 \geq T_{SC} \leq 15$ s e $0 \geq T_{CA} \leq 15$ s. A Figura 5.29 mostra os valores dos atrasos nesta etapa do experimento. A Figura 5.30 mostra o comportamento da saída da planta em malha fechada com a presença destes atrasos, para condição inicial nula e setpoint igual a 10%.

As figuras 5.28 e 5.30 mostram a melhoria obtida com a utilização do controlador com estimação, em relação ao controle sem nenhum tipo de compensação. Para o sistema com

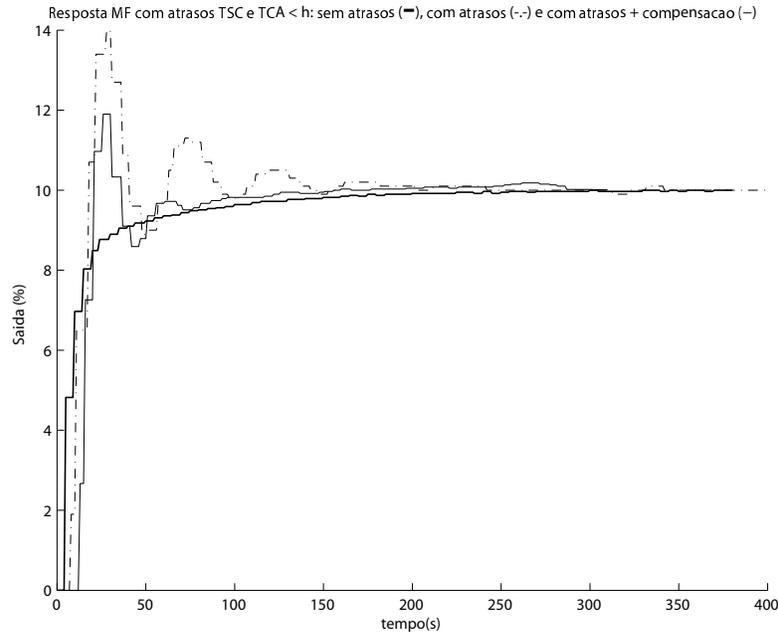


Figura 5.28: Resposta em MF para atrasos $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$

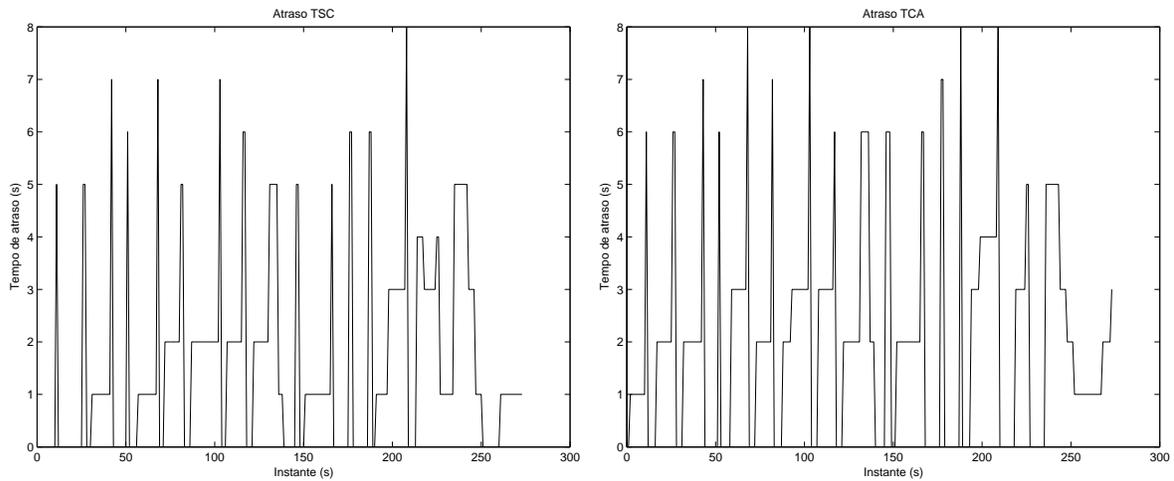


Figura 5.29: Valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} para $T_{SC} < h$ e $T_{CA} < h$

atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem, o controle implementado estabilizou o sistema que, na implementação não compensada, não se estabilizava no intervalo de tempo avaliado.

5.4.3 Análise da Estabilidade

Apesar do estudo da estabilidade de NCSs não fazer parte do escopo desta tese, foi realizado um estudo preliminar sobre a estabilidade do sistema de controle com com-

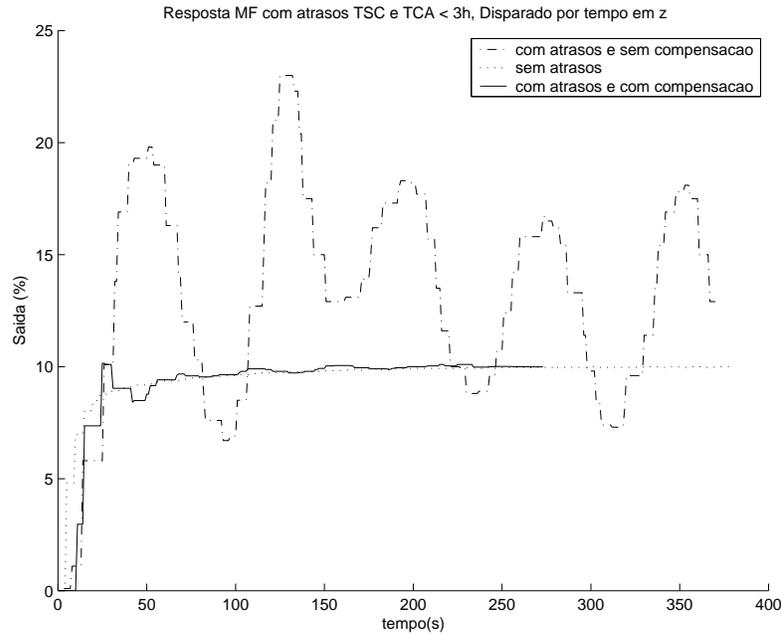


Figura 5.30: Resposta em MF para atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem

pensação explícita do sinal de controle em malha fechada, em uma certa condição operacional. O passo inicial foi a obtenção da função de transferência em malha fechada do sistema implementado na Figura 4.1, de forma que os atrasos façam parte da equação equivalente. Como os atrasos são variantes no tempo, foram adotados valores médios para representação de T_{SC} e T_{CA} , ou seja, foram considerados atrasos de valores fixos para esta análise de estabilidade.

A planta 1 foi modelada como um sistema de primeira ordem (eq. (2.1)) acrescido de tempo morto, em que o tempo morto é o atraso médio T_{CA} considerado. Analisando a condição de atrasos inferiores a 1 período de amostragem, foi considerado um atraso médio T_{CA} igual a 3 segundos. Foi analisada, também, a malha fechada para atrasos inferiores a 2 períodos de amostragem, em que foi considerado um atraso médio T_{CA} igual a 8 segundos. Considerando atrasos inferiores a 3 períodos de amostragem, utilizou-se como valor médio do atraso T_{CA} , o tempo de 13 segundos. Nas três situações, o intervalo de amostragem adotado foi de 5 segundos.

As funções de transferência da planta, em z , foram obtidas por meio da transformada z modificada (RAGAZZINI; FRANKLIN, 1958) e (KUO, 1970) do modelo da planta. No processo de discretização foi considerado um ganho equivalente de 0,4925 para a Planta 1, em função das conversões A/D e D/A, conforme descrito na seção 2.2.1. A função de transferência que representa o modelo da planta mais o atraso T_{CA} , com atrasos inferiores

a 1 período de amostragem, é representada pela eq. (5.1).

$$G(z) = \frac{0,0294z + 0,04083}{z^2 - 0,8574z} \quad (5.1)$$

O sistema de compensação do sinal de controle pode ser considerado um sistema do tipo *multirate* em função da forma com que é executado (disparado por eventos em instantes submúltiplos do período de amostragem) (GLASSON, 1983) e (CHEN et al., 1998). A situação aqui analisada considera atrasos inferiores a um período de amostragem. Como a medição é realizada de forma regular (disparada por tempo), não importa o instante em que o valor medido chega ao compensador (desde que esse tempo seja menor que um período de amostragem), o efeito equivale a de um atraso completo. Assim, é utilizado uma unidade de atraso (operador z^{-1}), para representação do disparo por evento Chegada de Medida, no compensador (BILBAO-GUILLERNA; SEN; ALONSO-QUESADA, 2008), (DUAN et al., 2008), (JIA, 2008), (MIZUOCHI; TSUJI; OHNISHI, 2005) e (LEE, 2006). Análise similar foi realizada para atrasos inferiores a dois e a três períodos de amostragem, em que foram adicionados dois e três atrasos no elo de compensação.

O atraso T_{SC} foi adicionado como um componente do elo de realimentação principal da malha de controle. Foram considerados os valores de 5, 10 e 15 segundos para os atrasos T_{SC} inferiores a um, dois e três períodos de amostragem, ou seja, z^{-1} , z^{-2} e z^{-3} , respectivamente.

A função de transferência equivalente para o NCS em malha fechada, no domínio z , para o filtro de compensação do sinal de controle sintonizado com $k_f = 0,7$ e $\gamma = 0,5$ (para esta análise), para atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a um período de amostragem, é dada pela eq. (5.2).

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{N1(z)}{D1(z)},$$

$$\begin{aligned} N1(z) &= 0,20286z^5 - 0,00671z^4 - 0,20569z^3 + 0,17721z^2 \\ &\quad - 0,12985z \\ D1(z) &= z^6 - 1,87322z^5 + 1,06538z^4 + 0,52336z^3 \\ &\quad - 1,15926z^2 + 0,59273z - 0,11133. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Para atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a dois períodos de amostragem, a função de transferência é dada pela eq. (5.3).

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{N2(z)}{D2(z)},$$

$$\begin{aligned} N2(z) &= 0,20286z^8 + 0,07442z^7 - 0,26919z^6 \\ &\quad + 0,02597z^5 + 0,07100z^4 + 0,03315z^3 - 0,09090z^2, \\ D2(z) &= z^{10} - 1,95740z^9 + 1,45845z^8 - 0,38184z^7 - 0,21241z^6 \\ &\quad + 0,42224z^5 - 0,34325z^4 + 0,10453z^3 - 0,13456z^2 \\ &\quad + 0,15837z - 0,06682. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Para atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem, a função de transferência é dada pela eq. (5.4).

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{N3(z)}{D3(z)},$$

$$\begin{aligned} N3(z) &= 0,20286z^{12} + 0,07442z^{11} - 0,26919z^{10} + 0,02597z^9 \\ &\quad + 0,07100z^5 + 0,03315z^4 - 0,09090z^3, \\ D3(z) &= z^{15} - 1,95740z^{14} + 1,39925z^{13} - 0,33966z^{12} \\ &\quad + 0,04874z^{11} - 0,53627z^{10} + 0,71067z^9 - 0,06007z^8 \\ &\quad - 0,42210z^7 + 0,31555z^6 - 0,07641z^5 + 0,00942z^4 \\ &\quad - 0,18675z^3 + 0,17876z^2 + 0,02089z - 0,05729. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Para o sistema sem nenhum tipo de compensação ou estimação, com o mesmo controlador PI em z e considerando atrasos T_{SC} e T_{CA} inferiores a três períodos de amostragem, a função de transferência é dada pela eq. (5.5).

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{N4(z)}{D4(z)},$$

$$\begin{aligned} N4(z) &= 0,20286z^5 + 0,09471z^4 - 0,25972z^3, \\ D4(z) &= z^8 - 1,85740z^7 + 0,85740z^6 + 0,20286z^2 + 0,09471z - 0,25972. \end{aligned} \quad (5.5)$$

A análise por Routh-Hurwitz mostra que a estabilidade dos sistemas com compensação explícita do sinal de controle, para atrasos inferiores a um, dois e três períodos de amostragem, está garantida para $0 < k_f < 1$ e $0 < \gamma < 1$.

Considerando o sistema sem nenhum tipo de compensação ou estimação e com atrasos inferiores a três períodos de amostragem, representado pela eq. (5.5), a análise por Routh-Hurwitz indica um sistema instável. Vale salientar que, na análise de estabilidade apresentada, não foram consideradas estruturas de saturação para sinais de controle e saída da planta.

Desta forma, a utilização da técnica de controle com compensação explícita do sinal de controle confere um grau extra de liberdade no projeto do controlador, visando a melhoria do desempenho e aumento da estabilidade em malha fechada. O estabelecimento de critérios para determinação dos parâmetros do filtro do compensador faz parte da proposta de estudos futuros apresentados no capítulo 6.1 desta tese.

5.5 Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes

5.5.1 Implementação do Sistema de Controle

A estratégia de controle proposta, denominada sistema de controle preditivo e adaptativo via redes, apresentada na seção 4.3 foi implementada no sistema de tanques interativos, utilizando a plataforma NCS-CMUF. Os resultados obtidos são agora apresentados.

Para que seja feita a análise do desempenho do sistema proposto será mostrado, inicialmente, o comportamento do sistema de tanques interativos em malha fechada, utilizando um controlador PI (sem o preditor de Smith) com os mesmos ajustes do controlador PI+PS utilizado. As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam o comportamento da vazão de saída do STI e a ação de controle aplicada, respectivamente, para o controlador PI, disparado por tempo, sem a utilização de estimadores ou qualquer outra forma de compensação.

Nas Figuras 5.33 e 5.34, são mostrados o desempenho do mesmo controlador anterior, porém com a adição de um estimador em z (mostrado na seção 3.3.1) e a ação de controle aplicada, respectivamente. Também foi realizado um teste com o mesmo controlador PI no modo de disparo por evento, em que o algoritmo de controle é executado sempre que uma medida chega à unidade remota (controlador). O comportamento da saída do STI é mostrado na Figura 5.35. A ação de controle aplicada pelo controlador é mostrada na Figura 5.36.

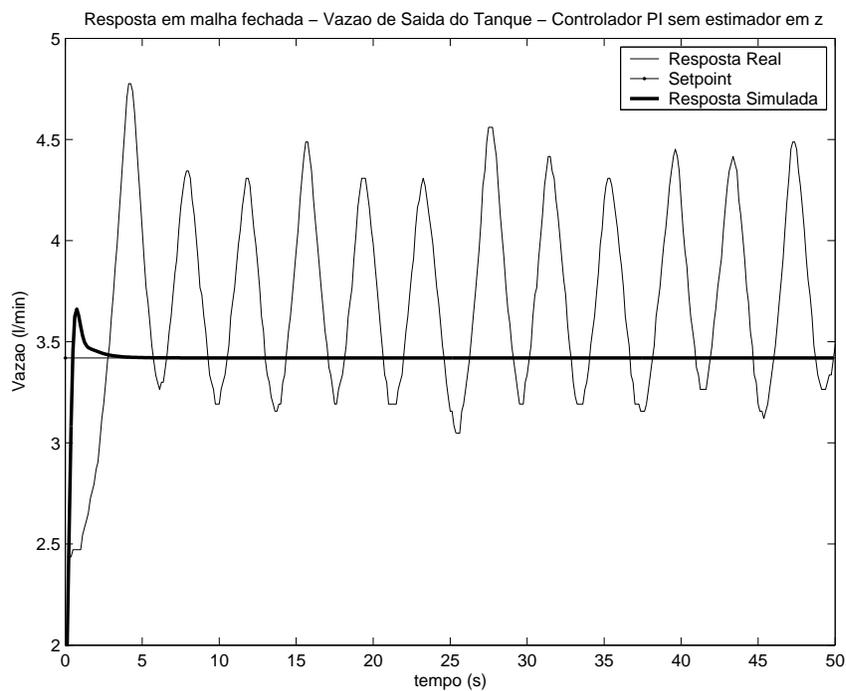


Figura 5.31: Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF, com controlador PI sem estimação

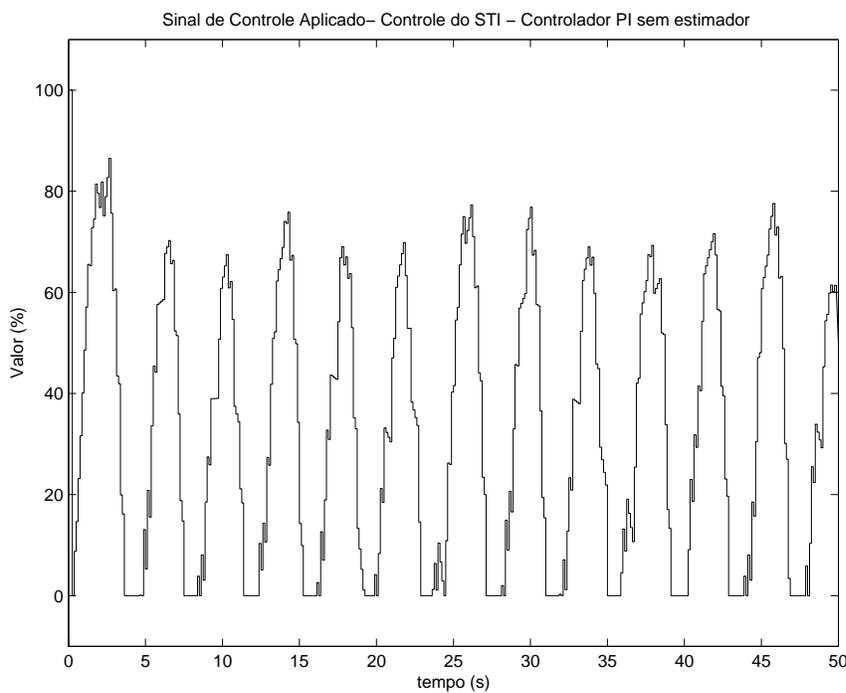


Figura 5.32: Ação de controle aplicada ao STI - Controlador PI sem estimação

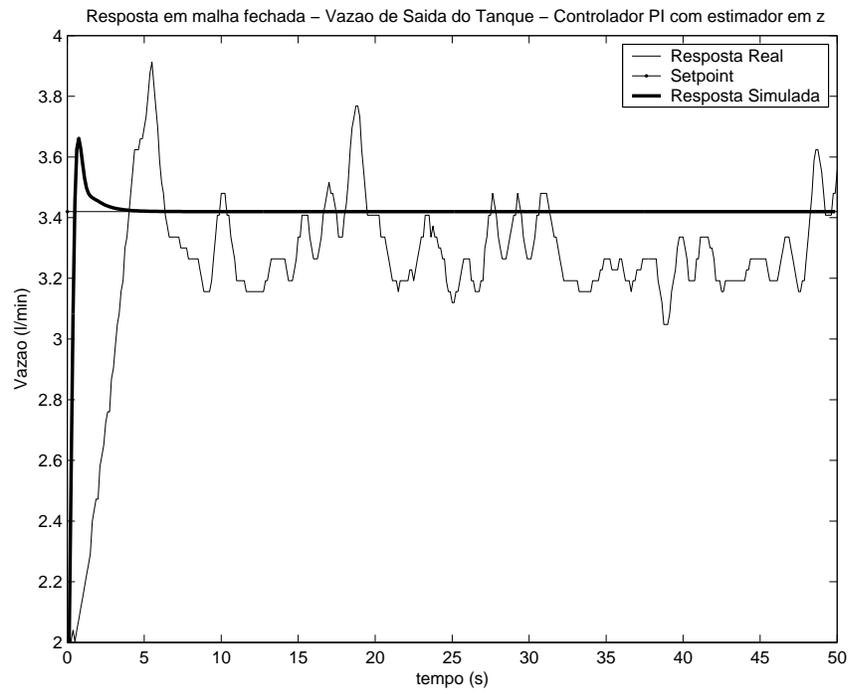


Figura 5.33: Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF, com controlador PI com estimador em z

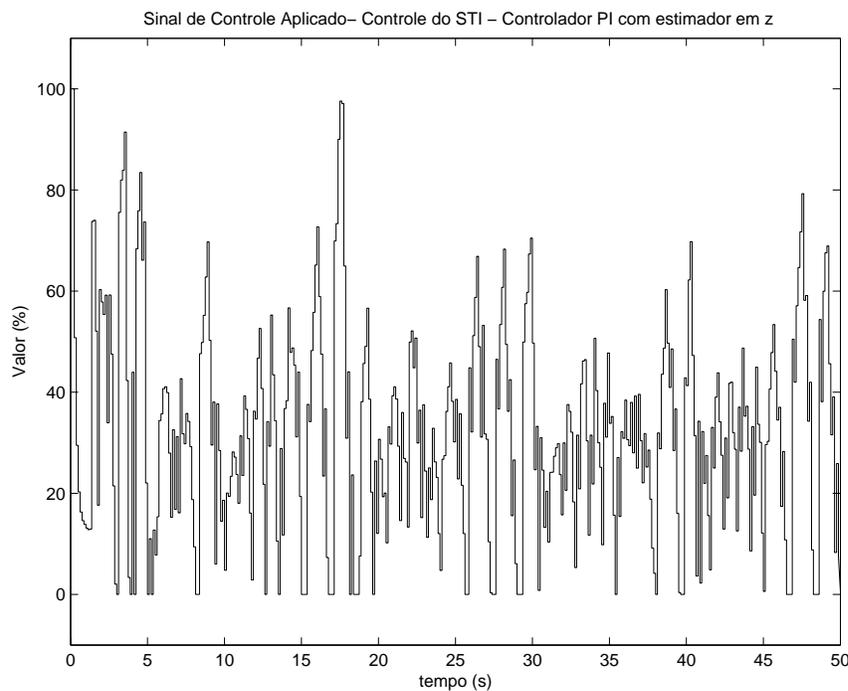


Figura 5.34: Ação de controle aplicada ao STI - Controlador PI com estimador em z

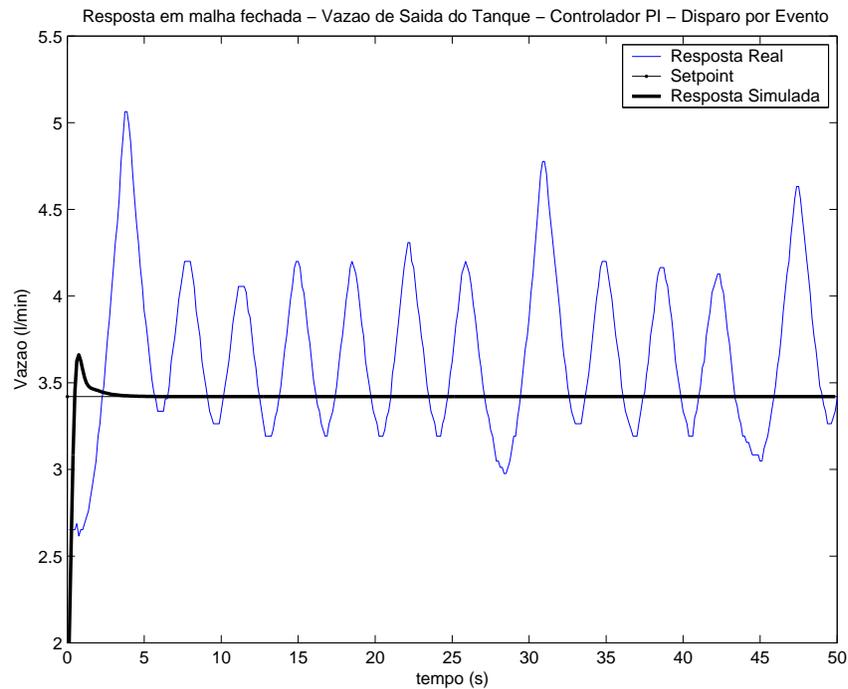


Figura 5.35: Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF, com controlador PI sem estimação disparado por evento

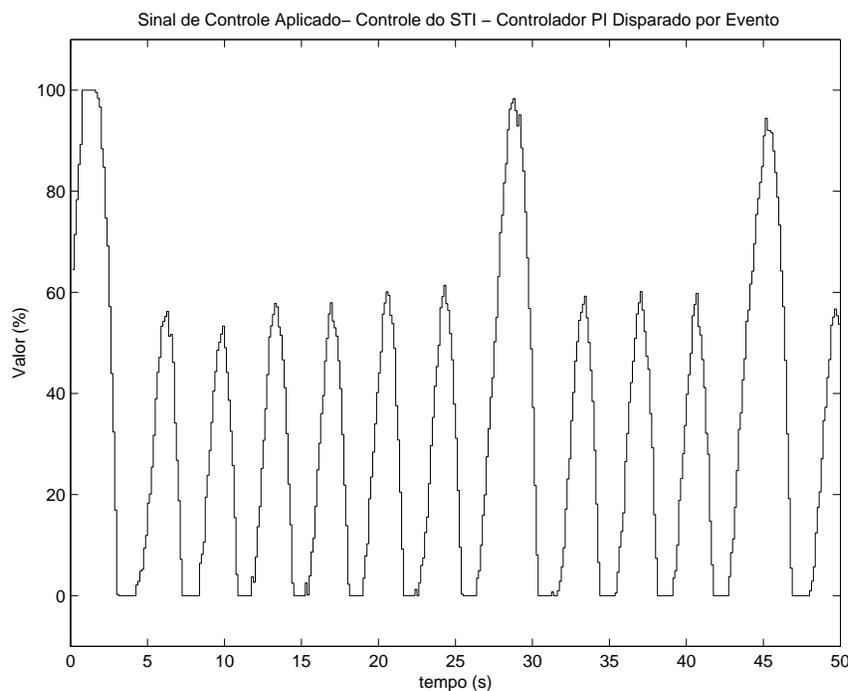


Figura 5.36: Ação de controle aplicada ao STI - Controlador PI disparado por evento

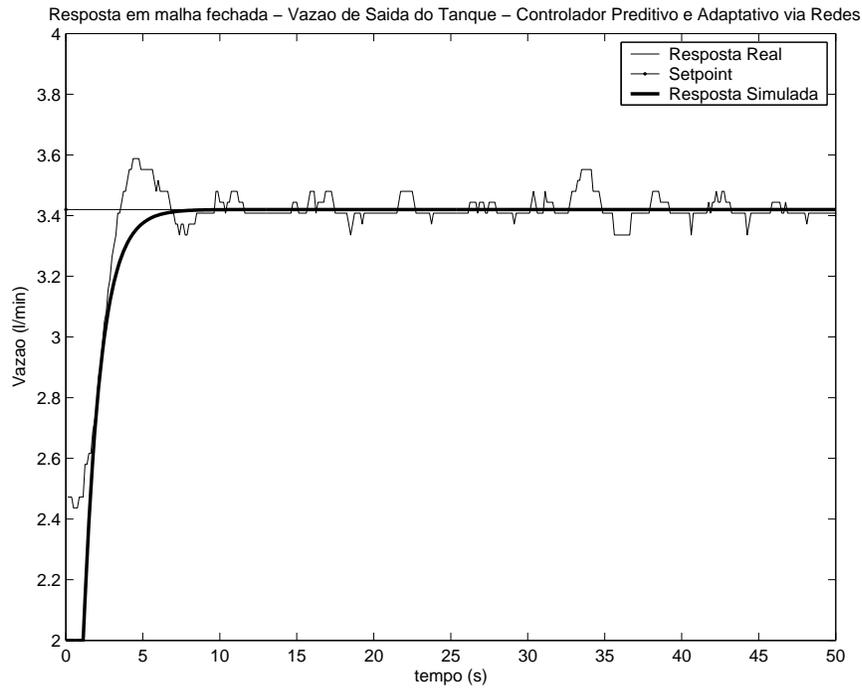


Figura 5.37: Resposta do STI em malha fechada na plataforma NCS-CMUF - Controlador preditivo e adaptativo via redes

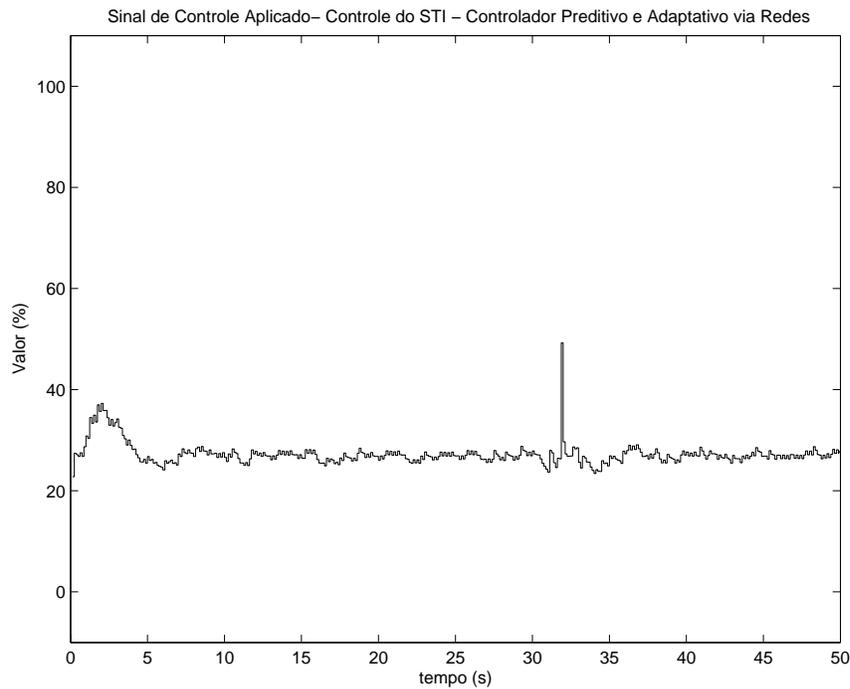


Figura 5.38: Ação de controle aplicada ao STI - Controlador preditivo e adaptativo via redes

Já a Figura 5.37 exhibe o comportamento do sistema em malha fechada com o emprego do controle preditivo e adaptativo via redes, ou seja, com a implementação do controlador

PI+PS juntamente com os demais módulos que compõe esta proposta de controle. A ação de controle aplicada pelo controlador é mostrada na Figura 5.38.

São apresentados os dados completos obtidos em uma sessão de testes do STI, na plataforma NCS-CMUF, utilizando todos os módulos da técnica de controle proposta. Inicialmente são apresentados os dados relativos aos atrasos presentes nos ensaios e, em seguida, os resultados referentes ao desempenho do sistema em malha fechada.

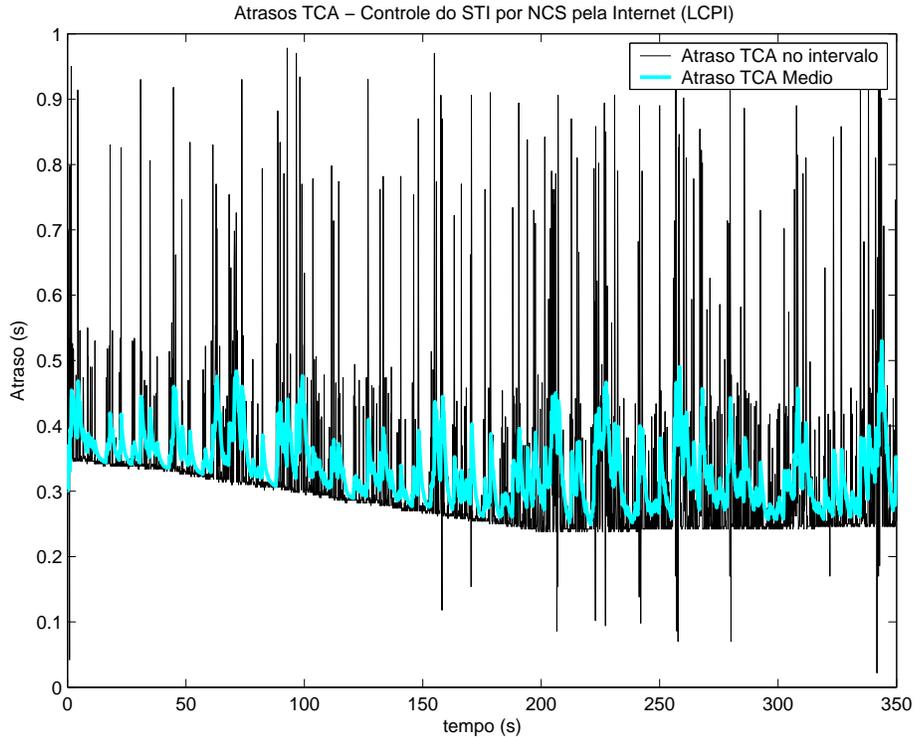


Figura 5.39: Variação do atraso T_{CA} na plataforma NCS-CMUF

A Figura 5.39 mostra o comportamento do atraso T_{CA} medido a partir das informações de *timestamps* presentes nas mensagens de confirmação da aplicação do sinal de controle. Na figura também é mostrado o valor do atraso T_{CA} médio ($\overline{T_{CA}}$) utilizado nos algoritmos dos estimadores e do controlador. Na Figura 5.40, são mostrados os valores inteiros e fracionários (m_{TCA} e n_{TCA}) que, somados, equivalem ao valor médio de T_{CA} apresentado na Figura 5.39.

As Figuras 5.41 e 5.42 mostram os valores estimados dos parâmetros da planta ($\theta_1 = e^{-h/\tau}$ e $\theta_2 = K(1 - \theta_1)$) pelo estimador MQR e os valores equivalentes ao ganho (K) e à constante de tempo da planta (τ), respectivamente. Na figura 5.42, os valores calculados para o ganho da planta foram obtidos por meio da relação entre os valores medidos para a saída da planta e os sinais de controle médios aplicados ao STI, em cada intervalo

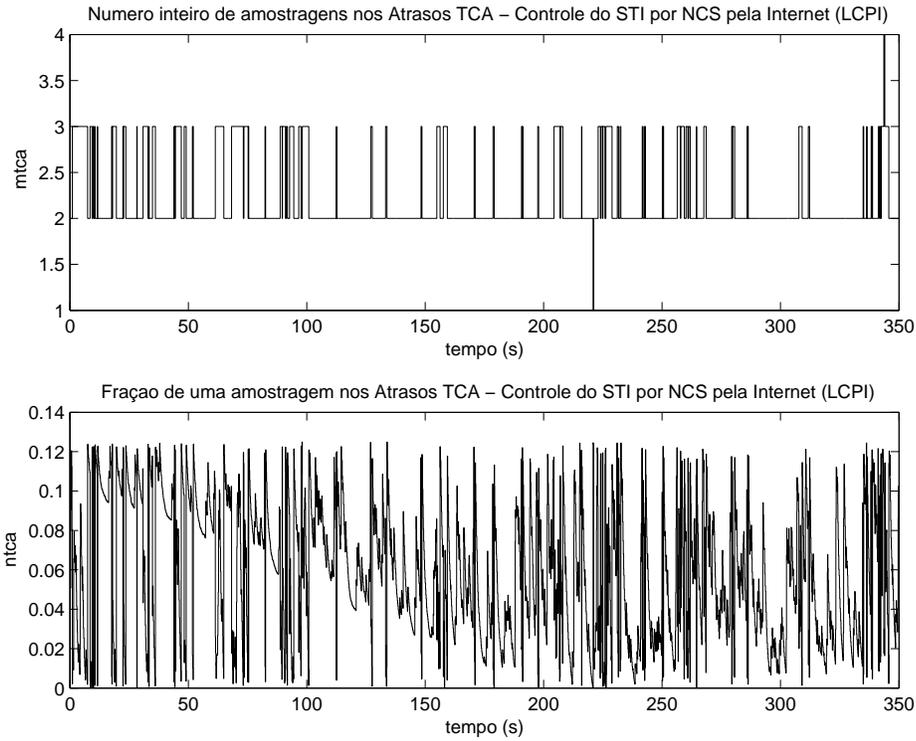


Figura 5.40: Parcelas m_{TCA} e n_{TCA} no atraso T_{CA} médio da Figura 5.39

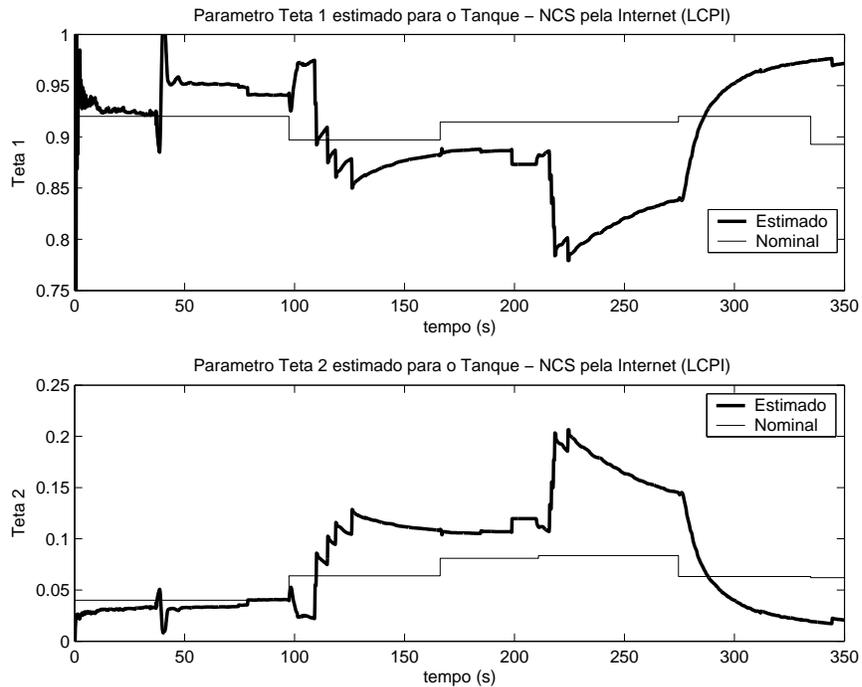


Figura 5.41: Parâmetros θ_1 e θ_2 estimados para o STI

de amostragem, levando-se em conta os atrasos T_{CA} medidos. Estes valores de ganhos calculados representam os ganhos reais da planta em cada faixa de operação. Os valores

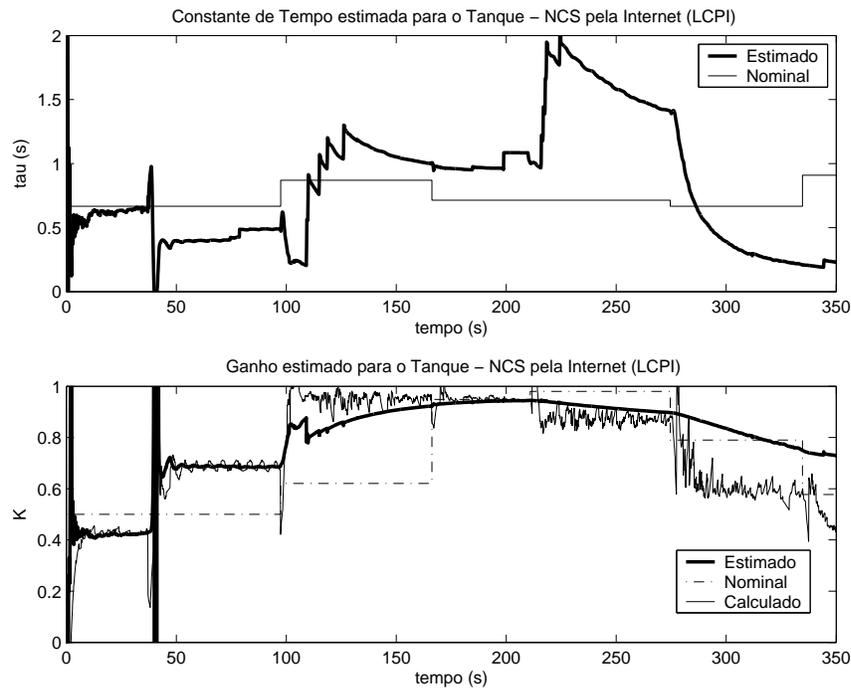


Figura 5.42: Ganho e constante de tempo estimados para o STI

calculados mostram que os ganhos nominais considerados para o STI estão mal ajustados nesta implementação; por outro lado, confirmam a qualidade do estimador de parâmetros, já que os valores estimados apresentam boa convergência para os ganhos reais da planta. Os valores nominais considerados para os parâmetros ganho e constante de tempo da planta são apresentados na figura 2.5, na seção 2.2.3 que descreve o STI.

Na Figura 5.43, são mostrados os valores de sinais de controle calculados pelo algoritmo PI+PS e enviados à planta de tanques interativos. Finalmente, a Figura 5.44 apresenta o comportamento da saída da planta (Vazão do TQ02) para o teste realizado. O resultado mostra que, mesmo na presença de atrasos com grande faixa de variação relativa e com a relação atraso/amostragem chegando a quase 8, o sistema apresentou um bom desempenho.

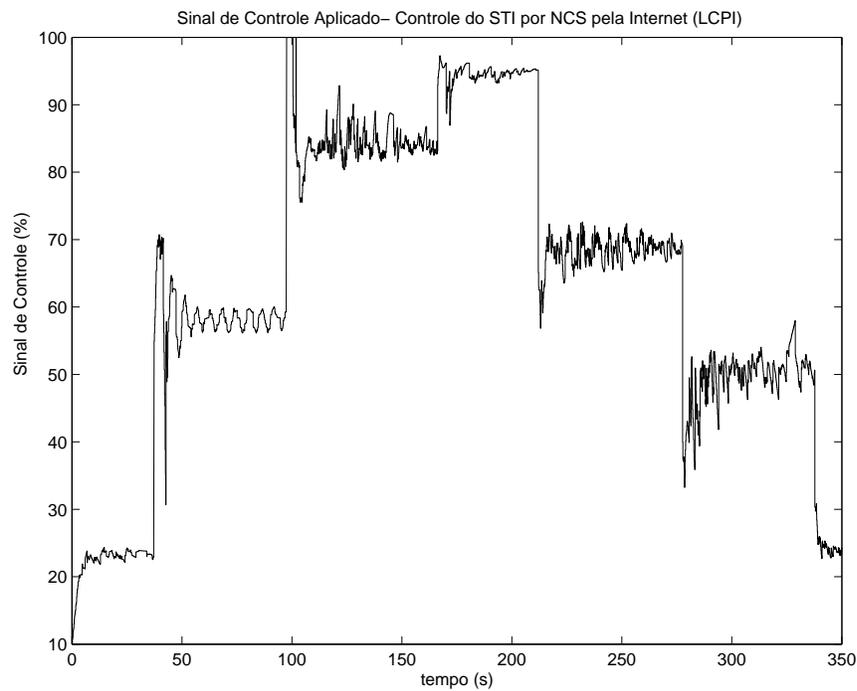


Figura 5.43: Sinais de controle aplicados ao STI

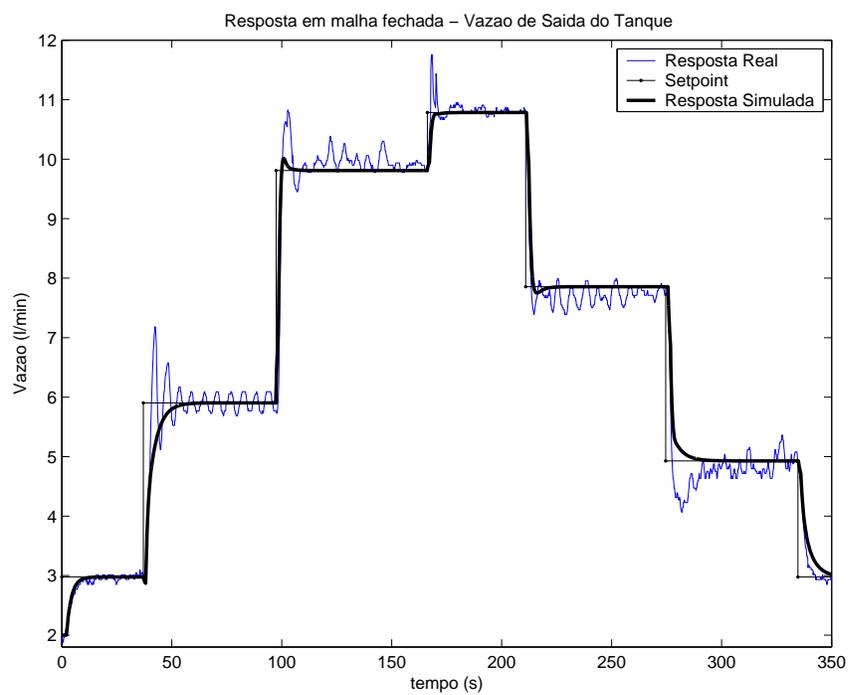


Figura 5.44: Comportamento da vazão de saída do TQ02 no teste

5.5.2 Análise da Estabilidade

Foi realizado um estudo preliminar sobre a estabilidade do sistema de controle preditivo e adaptativo via redes em malha fechada.

O passo inicial foi a obtenção da função de transferência em malha fechada do sistema implementado na figura 4.4, de forma que os atrasos façam parte da equação equivalente. Como os atrasos são variantes no tempo, foram adotados valores médios para representação de T_{SC} e T_{CA} . A planta foi modelada como um sistema de primeira ordem mais tempo morto, em que o tempo morto foi acrescido do atraso T_{CA} . Considerando um intervalo de amostragem de 125 milisegundos e 200 milisegundos para o valor médio do atraso T_{CA} (atraso de valor fixo), a função de transferência da planta, em z , foi obtida por meio da transformada z modificada (RAGAZZINI; FRANKLIN, 1958) e (KUO, 1970) do sistema representado pela eq. (5.6).

$$G(s) = \frac{0,75e^{-(T_{CA}+\theta_p)s}}{1,3s+1} = \frac{0,75e^{-0,7s}}{1,3s+1} \quad (5.6)$$

em que $\theta_p = 0,5$.

O atraso T_{SC} foi adicionado como um componente do elo de realimentação principal da malha de controle. Foi considerado o valores de 250 milisegundos para o atraso T_{SC} , ou seja, a adição de um operador z^{-2} na realimentação da malha.

A função de transferência equivalente para o NCS em malha fechada, no domínio z , considerando os mesmos valores do controlador mostrados na Tabela 3.1, é apresentada na eq. (5.7).

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{1,77401z^2}{1,64823 - 1,24599z^2 - 0,402609z^3 - 8,22561z^7 + 10z^8} \quad (5.7)$$

O critério de Routh-Hurwitz indicou estabilidade do sistema para valores de $0 < k_p < 7,2$. Este valor é bem superior ao de 2,58 utilizado como valor de ganho proporcional nesta fase de testes.

Considerando o sistema em malha fechada com um controlador PI contendo os mesmos ganhos da tabela 3.1, sem estimação e sem compensação (resposta mostrada na figura 5.31), a função de transferência equivalente é dada pela eq. (5.8). Neste caso, o critério de Routh-Hurwitz confirma a instabilidade do sistema.

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{-0,43236z^2 + 0,48441z^3}{-0,43236 + 0,48441z + 0,90830z^7 - 1,90830z^8 + z^9} \quad (5.8)$$

5.6 Conclusão

Neste capítulo foram mostrados os efeitos dos atrasos induzidos pela rede em um NCS. Foram apresentados os efeitos dos atrasos apenas na medição, apenas na atuação e na medição e atuação concomitantemente. Foram avaliadas as situações em que os atrasos foram limitados a um e a três períodos de amostragem, trabalhando com controladores em Delta e em z e com disparo por tempo e por evento. Implementações de um NCS em várias arquiteturas de redes, utilizando a plataforma NCS-CMUF, também foram avaliadas e os resultados mostraram a influência dos atrasos na resposta da planta neste tipo de sistema.

São apresentados os resultados do sistema em malha fechada com a implementação do sistema de controle com compensação explícita do sinal de controle. As respostas obtidas mostraram a melhoria alcançada com a aplicação da técnica proposta em sistemas que não possuem informações sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle.

A implementação do sistema de controle preditivo e adaptativo via redes, proposto no capítulo anterior, foi realizada na plataforma NCS-CMUF. Os resultados obtidos mostraram bom desempenho e estabilidade (para uma dada condição operacional) da malha fechada em um NCS do qual a Internet faz parte.

6 Conclusão

6.1 Conclusão Geral

Neste texto, foram apresentadas as principais metodologias de controle aplicadas a NCS, mostrando o estado da arte em controle de sistemas via redes. Também são avaliadas as principais questões relacionadas com o problema dos atrasos em sistemas de controle via redes.

Para o estudo desses sistemas foram utilizadas três plantas. Duas plantas emuladas, constituídas por circuitos RC série, que tem por objetivo emular o comportamento dinâmico de uma variável com características equivalentes a de um sistema de primeira ordem e uma planta física, um sistema de tanques interativos.

Também foram desenvolvidas duas plataformas NCSs. Uma plataforma, denominada Plataforma Didática, possui o objetivo de emular um sistema de controle via redes por meio da utilização de unidades de geração de atrasos (*buffers*) que permitem controlar o tempo entre a transmissão das mensagens, proporcionando um efeito semelhante ao dos atrasos induzidos pela rede. A outra plataforma, denominada Plataforma NCS-CMUF é um sistema distribuído de arquitetura aberta que permite a implementação de sistemas de controle via redes com acompanhamento do tráfego de mensagens. Na plataforma NCS-CMUF, as mensagens transmitidas possuem carimbos de tempo (tickstamps) que permitem a identificação dos instantes de amostragens dos sinais na planta.

Os efeitos da presença dos atrasos T_{SC} e T_{CA} em um NCS foram investigados para várias configurações de atrasos, redes e controladores.

Foram descritas as representações matemáticas dos controladores, estimadores e preditores utilizados para testes e para a formulação de estratégias de controles. São descritos os controladores PI, expressos em z e em Delta e controlador PI com Preditores de Smith e ação “anti-windup”. Estes controladores foram projetados pelo Método da Síntese Direta e são utilizados para o controle das plantas 1, 2 e STI via redes.

Também foram apresentadas as formulações matemáticas dos estimadores de variáveis de saída, em z e em Delta. Estes estimadores tem por finalidade fornecer valores estimados da saída da planta para o controlador na ausência da medida real. O estimador em z é baseado no modelo ARMAX, para sistemas LTI e o estimador em Delta, baseado na transformada Delta e na representação pseudo-contínua de sistemas. Um estimador de parâmetros da planta, desenvolvido com a técnica de mínimos quadrados recursivos, com fator de esquecimento e garantia de estabilidade numérica por meio da fatoração U-D, foi também desenvolvido e apresentado.

Um módulo para identificação de perdas de pacotes em NCSs também foi apresentado. Este módulo tem por objetivo avaliar a perda de pacotes no envio de sinais de controle.

Duas propostas de sistemas de controle via redes são apresentadas. A primeira proposta, denominada Sistema de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle para NCSs, foi desenvolvida para ser implementada em sistemas que não possuem informações sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle. Essa proposta faz uso de um estimador para valores de saída da planta, em z , 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, para que possa ser feita uma correção adicional no sinal de entrada da planta.

A segunda proposta, denominada Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes, foi desenvolvida para ser implementada em sistemas nos quais as informações sobre os instantes de medição e de aplicação dos sinais de controle estão disponíveis. Essa proposta de controle utiliza módulos que são responsáveis por resolver questões problemáticas associadas aos NCSs. São integrados módulos de sincronização entre as máquinas local e remota, um estimador para valores de saída da planta baseado em transformada δ , um estimador de parâmetros da planta, controlador com Preditor Smith e um sistema preliminar de chaveamento entre os controladores Remoto e Local.

Os resultados apresentados mostraram a eficiência das metodologias de controle propostas nas condições consideradas.

6.2 Contribuições da Tese

1- Estudo dos Atrasos em NCS. Em uma malha de controle que tem o loop formado por uma rede de comunicação, a presença dos atrasos induzidos pela rede pode alterar o desempenho e a estabilidade do sistema. Os atrasos T_{SC} e T_{CA} causam efeitos

diferentes no comportamento da planta. Quanto maior o atraso, seja T_{SC} ou T_{CA} , maiores as oscilações do sistema, o sobressinal e o tempo para estabilização (caso seja possível a estabilização).

2- Plataforma Didática para Testes de NCS. Em função da dificuldade em se controlar e medir os atrasos provocados por uma rede de comunicação real, foi criada uma plataforma didática de testes, na qual os enlaces de rede entre sensor e controlador e entre controlador e atuador foram substituídos por *buffers* que permitem variar de forma manual ou automática, isolada ou concomitante os valores dos atrasos T_{SC} e T_{CA} . A estrutura foi implementada em um Controlador Lógico Programável (CLP), no qual a CPU funciona como o controlador, uma entrada analógica funciona como módulo sensor e uma saída analógica funciona como módulo atuador. A flexibilidade proporcionada pela plataforma didática de testes sugerida permite a implementação de variadas estratégias de controle em vários cenários de rede.

3- Sistema de Controle com Compensação Explícita do Sinal de Controle. Uma estratégia de controle preliminar para compensação do sinal de controle foi desenvolvida; essa faz uso de um estimador para valores de saída da planta e de um observador para a entrada da planta, que calcula o valor da ação de controle efetivamente aplicada ao sistema, em cada intervalo de amostragem, fornecendo um valor de déficit que, adicionado integral ou parcialmente ao sistema em amostragens seguintes, minimiza o efeito provocado pelo atraso controlador-atuador. Nesta proposta destaca-se como principal contribuição a utilização do elo de realimentação do sinal de controle que adiciona um grau de liberdade ao projeto do sistema de controle.

4- Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes. Foi proposta uma técnica de controle para NCS que utiliza vários módulos em conjunto visando solucionar os principais problemas existentes nestes sistemas. Nesta proposta, o projeto do controlador é feito com base nos parâmetros da planta e todas ações de sincronização, estimação, predição, chaveamento e cálculo dos sinais de controle é feita com os sinais de entrada e saída da planta, juntamente com informações de tempo (*tickstamps*) que acompanham estes sinais. A técnica de controle proposta foi baseada numa estrutura de controle NCS desenvolvida, denominada plataforma NCS-CMUF. Nesta proposta, destaca-se como importante contribuição, a utilização do estimador de variáveis de saída em Delta, que é caracterizado com uma estrutura preditiva e adaptativa que permite a estimação com horizonte variável (em função do atraso T_{CA}) e em intervalos regulares e irregulares. Outra importante contribuição é o estimador de parâmetros que utiliza o algoritmo de mínimos

quadrados recursivos, com fator de esquecimento e garantia de estabilidade numérica por meio da fatoração U-D, adaptado para o emprego em sistemas de controle via redes.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

1- Estudos sobre Controle com Compensação do Sinal de Controle. A estratégia de controle por compensação explícita do sinal de Controle, desenvolvida neste trabalho, apresentou um potencial interessante como controlador para sistemas de controle com atrasos na atuação, tais como os NCSs. Seria interessante a realização de estudos mais aprofundados sobre a implementação desta metodologia, principalmente no que diz respeito ao projeto dos filtros para controle da dinâmica de compensação.

2- Sincronização Dinâmica dos Relógios. Neste trabalho foi implementado um algoritmo para sincronização entre as duas estações com o objetivo de proporcionar uma certa simultaneidade entre os instantes de amostragens dos relógios local e remoto. Para que seja garantida uma efetiva sincronização entre estes dois relógios é interessante a implementação de um mecanismo ativo de sincronização que, de alguma forma, compense a diferença relativa entre os relógios. Esta compensação pode se dar por um mecanismo de reset de um dos relógios ou pela adição de uma parcela de compensação dinâmica em um dos relógios, como no algoritmo de compensação mostrado no trabalho de Nilsson (NILSSON, 1998).

3- Criptografia dos Dados. Na estrutura NCS utilizada para implementação da proposta de controle neste trabalho: a plataforma NCS-CMUF, não foram utilizados mecanismos de criptografia dos dados entre as estações local e remota em função do caráter experimental do trabalho. Para a efetiva implantação da estrutura proposta em uma edificação real, faz-se necessário a inclusão de mecanismos de segurança dos dados, tal como a criptografia, para garantir a segurança das informações e dos acessos às unidades do sistema, já que a rede pública faz parte do circuito de comunicação.

4- Transferência de Dados por UDP. Para a troca de mensagens entre as estações local e remota, via Internet, foram utilizados *sockets* TCP/IP em função das características de garantia que o protocolo oferece, dentre elas o controle de erros com retransmissão, o sequenciamento e a garantia de entrega dos dados ao destinatário. Os dados transportados são envelopados num frame ethernet, o qual se constitui de no mínimo 84 bytes. Considerando que cada informação completa que trafega entre as estações possui no máximo 11 bytes, pode-se concluir que o *overhead* presente nesta configuração é grande.

Uma possibilidade interessante a ser avaliada é a utilização da transferência por UDP, na qual a confiabilidade seria substituída pela velocidade de transmissão, as características de garantia seriam implementadas no nível de Aplicação. Esta implementação poderia conferir melhor desempenho global ao sistema.

5- Análise da Estabilidade em NCSs. Nas duas proposta apresentadas, sistema de controle com compensação explícita do sinal de controle e sistema de controle preditivo e adaptativo via redes, foram realizados estudos preliminares de estabilidade para uma dada condição de atraso médio entre controlador a atuador ($\overline{T_{CA}}$). Considerando que esses atrasos são variáveis no tempo, faz-se necessário a utilização de técnicas que permitam a análise da estabilidade dos sistemas de controle via redes nestas condições de atraso.

6- Controle por Eventos. A maioria dos trabalhos e pesquisas, na área de controle automático, considera os sistemas como sendo periódicos e com períodos de amostragem regulares. A razão principal para isto é a existência de uma teoria de sistema bem estabelecida e comprovada. Porém, há casos em que o acontecimento de um evento é o melhor momento para que sejam tomadas ações corretivas, como por exemplo, a ultrapassagem de uma faixa de setpoint ou mesmo a chegada de uma mensagem em um NCS. Estes sistemas de controle são denominados assíncronos ou baseados em eventos. Trabalhos já publicados na literatura científica, dentre eles (ARZEN, 1999) e (ASTROM, 2006) mostram a eficácia deste tipo de implementação em NCSs. A implementação desta metodologia de controle na plataforma NCS-CMUF, como uma forma de redução do tráfego de mensagens entre as estações e melhoria de desempenho, seria bastante interessante e válida.

7- Chaveamento entre Controladores. A utilização da rede pública, em função da inclusão da Internet na rede de comunicação que fecha a malha de controle, representa um ponto de fragilidade no NCS. A ocorrência de perda do link de comunicação nesse nível de rede precisa ser considerada. A solução mais plausível para este evento é chaveamento do controlador da planta do nível remoto para o nível local, situado no nível da planta. Um outro aspecto importante em relação ao chaveamento de NCSs é a questão do retorno do controle à unidade remota ao ser restabelecida a comunicação pela Internet. A questão de chaveamento ainda é um tema em aberto dentro da área de controle e para os sistemas de controle via redes representa um desafio extra em função dos aspectos de sincronização entre as unidades e da presença dos atrasos.

Referências

- ALBERT, A. Comparison of event-triggered and time-triggered concepts with regard to distributed control systems. *Proceedings of the Embedded World 2004 - Nurnberg*, p. 235–252, 2004.
- ALMUTAIRI, N. B.; CHOW, M.-Y.; TIPSUWAN, Y. Network-based controlled dc motor with fuzzy compensation. *Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, v. 3, p. 1844–1849, 2001.
- ARZEN, K.-E. A simple event-based PID controller. *Proceedings of the 14th World Congress of IFAC*, v. Q, p. 423–428, 1999.
- ASTROM, K. J. Event based control. *CASY Workshop Bertinoro*, p. 1–56, 2006.
- ASTROM, K. J.; HANG, C. C.; LIM, B. C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 39, n. 2, p. 343–345, 1994.
- ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer Controlled Systems: Theory and Design - 3rd. ed.* New York: Prentice Hall, Inc., 1997. ISBN 013314899-8.
- BATISTA, A. P. *Monitoração e Controle de Processos Térmicos em Edificações por meio de um Sistema Distribuído*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2006.
- BELDIMAN, O.; WALSH, G. C.; BUSHNELL, L. Predictors for networked control systems. *Proceedings of the 2000 American Control Conference*, v. 4, p. 2347–2351, 2000.
- BIERMAN, G. J. *Factorization methods for discrete sequential estimation*. New York: Academic Press, 1977.
- BIERMAN, G. J.; THORNTON, C. L. Numerical comparison of Kalman filter algorithms: Orbit determination case study. *Automatica*, v. 13, n. 1, p. 23–35, 1977.
- BILBAO-GUILLERNA, A.; SEN, M. de la; ALONSO-QUESADA, S. A new approach to the study of controlled systems: Multiestimation adaptive discrete control with multirate sampling. *Kybernetes*, v. 37, n. 6, p. 801 – 826, 2008.
- BORGES, R. A.; OLIVEIRA, R. C. L. F.; ABDALLAH, C. T.; PERES, P. L. D. H_∞ robust memory controllers for networked control systems: Uncertain sampling rates and time delays in polytopic domains. *Proceedings of the 2008 American Control Conference*, p. 3614–3619, 2008.
- BRAGA, A. R. *Implementação de Estratégias de Controle Multimalha e Multivariável*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 1994.

- BRANICK, M. S.; PHILLIPS, S. M.; ZHANG, W. Stability of networked control systems: Explicit analysis of delay. *Proceedings of the 2000 American Control Conference*, p. 2352–2357, 2000.
- CAN, Y.; SHAN-AN, Z.; WAN-ZENG, K.; LI-MING, L. Application of generalized predictive control in networked control system. *Journal of Zhejiang University - Science A*, v. 7, n. 2, p. 225–233, 2006.
- CARNEVALE, D.; TEEL, A. R.; NESIC, D. A Lyapunov proof of an improved maximum allowable transfer interval for networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 52, n. 5, p. 892 – 897, 2007.
- CAUFFRIEZ, L.; CICCOTELLI, J.; CONRARD, B.; BAYART, M. Design of intelligent distributed control systems: a dependability point of view. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 84, n. 1, p. 19–32, 2004.
- CERVIN, A.; LINCOLN, B.; EKER, J.; ARZEN, K.-E.; BUTTAZZO, G. The jitter margin and its application in the design of real-time control systems. *Proceedings of the 10th International Conference on Real-Time and Embedded Computing Systems and Applications*, Goteborg, Sweden, 2004.
- CHAI, S.; LIU, G.-P.; REES, D.; XIA, Y. Design and practical implementation of Internet-Based predictive control of a servo system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 16, n. 1, p. 158–168, 2008.
- CHAN, H.; OZGUNER, U. Closed-loop control of systems over a communication network with queues. *International Journal of Control*, v. 62, p. 811–815, 1995.
- CHANDRA, R. S.; LANGBORT, C.; D´ANDREA, R. Distributed control design with robustness to small time delays. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, p. 4850–4855, 2005.
- CHEN, C.-H.; LIN, C.-L.; HWANG, T.-S. Stability of networked control systems with time-varying delays. *IEEE Communications Letters*, v. 11, n. 2, p. 270–272, 2007.
- CHEN, R.; GUO, G.; HUANG, T.; LOW, T.-S.; WEERASOORIYA, S. Optimal multirate control design for hard disk drive servo systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 34, n. 4, p. 1898–1900, 1998.
- CHEN, Z.; LIU, L.; YIN, X. Networked control system with network time-delay compensation. *Proceedings of the 40th Annual General Meeting - Industry Applications Society*, p. 2435–2440, 2005.
- CHOW, M.-Y.; TIPSUWAN, Y. Network-based control adaptation for network QoS variation. *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference*, v. 1, p. 257–261, 2001.
- CHRISTIAN, F.; FETZER, C. Probabilistic internal clock synchronization. *Proceedings of the Thirteenth Symposium on Reliable Distributed Systems*, p. 22–31, 1994.
- CLOOSTERMAN, M.; WOUW, N. van de; HEEMELS, W.; NIJMEIJER, H. Stability of networked control systems with large delays. *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, p. 5017–5022, 2007.

- CLOOSTERMAN, M.; WOUW, N. van de; HEEMELS, W.; NIJMEIJER, H. Stabilization of networked control systems with large delays and packet dropouts. *Proceedings of the 2008 American Control Conference*, p. 4991–4996, 2008.
- COULOURIS, G.; DOLLIMORE, J.; KINDBERG, T. Distributed systems : Concepts and design. Addison-Wesley, Harlow, England, 1996.
- DUAN, C.; GU, G.; DU, C.; CHONG, T. C. Robust compensation of periodic disturbances by multirate control. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 44, n. 3, p. 413–418, 2008.
- FERNANDES, H. *Implementação de Sistemas de Monitoramento Remoto*. Belo Horizonte, MG: Monografia de Projeto Final de Curso - Engenharia de Controle e Automação UFMG, 2006.
- GAO, H.; CHEN, T.; LAM, J. A new delay system approach to network-based control. *Automatica*, v. 44, p. 39– 52, 2008.
- GARCÍA-RIVERA, M.; BARREIRO, A. Analysis of networked control systems with drops and variable delays. *Automatica*, v. 43, p. 2054 – 2059, 2007.
- GLASSON, D. Development and applications of multirate digital control. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 3, n. 4, p. 2–8, 1983. ISSN 0272-1708.
- GOKTAS, F. *Distributed Control of Systems over Communication Networks*. Tese (Doutorado) — University of Pennsylvania, Pennsylvania, Philadelphia, 2000.
- GOODWIN, G. C.; GRAEBE, S. F.; SALGADO, M. E. *Control System Design*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
- GOODWIN, G. C.; MIDDLETON, R. H. High-speed digital signal processing and control. *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 2, p. 240–259, 1992.
- GOODWIN, G. C.; QUEVEDO, D. E.; SILVA, E. I. Architectures and coder design for networked control systems. *Automatica*, v. 44, p. 248– 257, 2008.
- GUPTA, V.; HASSIBIA, B.; MURRAY, R. M. Optimal LQG control across packet-dropping links. *Systems & Control Letters*, v. 56, n. 6, p. 439–446, 2007.
- HALEVI, Y.; RAY, A. Integrated communication and control systems: Part I analysis. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, v. 110, n. 4, p. 367–373, 1988.
- HASSAPIS, G. Implementation of predictive control algorithms on networked control systems. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, p. 1936–1941, 2006.
- HESPANHA, J. P.; NAGHSHTABRIZI, P.; XU, Y. A survey of recent results in networked control systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 1, p. 138–162, 2007.
- HIRANO, H.; MUKAI, M.; AZUMA, T.; FUJITA, M. Optimal control of discrete-time linear systems with network-induced varying delay. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, p. 1419–1424, 2005.

- HONG, S. H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 3, n. 2, p. 225–230, 1995.
- HU, L.-S.; BAI, T.; SHI, P.; WU, Z. Sampled-data control of networked linear control systems. *Automatica*, v. 43, p. 903–911, 2007.
- HU, W.; LIU, G. P.; REES, D. Design and implementation of networked predictive control systems based on round trip time delay measurement. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, p. 674–679, 2006.
- ISO THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, D. P. *OSI Systems Interconnection Basic Reference Model*. [S.l.]: ISO Doc. DIS7498, 1985.
- JACQUES, T. V. M. *Comunicação Remota com Garantia de Segurança e Continuidade entre Redes de Monitoramento e um Servidor de Dados*. Belo Horizonte, MG: Monografia de Projeto Final de Curso - Engenharia de Controle e Automação UFMG, 2006.
- JIA, Q. New design of multirate digital control scheme for computation saving. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, p. 1–4, 2008.
- JOTA, F.; GOODWIN, G. Switching control: Some stability results. *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, v. 3, p. 2209 – 2210, 1997.
- JOTA, F. G. *The Application of Self-tuning Control Techniques to a Multivariable Process*. Tese (Doutorado) — University of Oxford, Wolfson College, Oxford, Inglaterra, 1987.
- JOTA, F. G.; JOTA, P. R. S.; NOBRE, E. C. Centro de monitoramento de usos finais. *Projeto FNDCT/CT-ENERG e CEMIG - Belo Horizonte, MG*, 2002.
- JOTA, F. G.; JOTA, P. R. S.; NOBRE, E. C. Centro de monitoramento de usos finais. *Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, p. 125–130, 2005.
- JOTA, P. R. S.; JOTA, F. G.; SANTOS, T. A.; NOBRE, E. C. Formação de gerentes de energia para prédios públicos. *XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, p. 1–14, 2000.
- KAO, C.-Y.; LINCOLN, B. Simple stability criteria for systems with time-varying delays. *Automatica*, v. 40, p. 1429–1434, 2004.
- KAZMAIER, U. *Sistema Distribuído de Aquisição de Dados*. Karlsruhe, Alemanha: Monografia de Projeto Final de Curso (*Diplomarbeit*), Fachhochschule Karlsruhe, University of Applied Sciences, 2003.
- KIM, W.-J.; JI, K.; AMBIKE, A. Networked real-time control strategies dealing with stochastic time delays and packet losses. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, p. 621–626, 2005.
- KIM, W. jong; JI, K.; AMBIKE, A. Real-time operating environment for networked control systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 3, n. 3, p. 287–296, 2006. ISSN 1545-5955.

- KO, C.; CHEN, B.; JIANPING, C.; ZHUANG, Y.; TAN, K. C. Development of a web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus. *IEEE Transactions on Education*, v. 44, n. 1, p. 76–86, 2001.
- KUO, B. C. *Discrete Data Control Systems*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., 1970.
- LEE, K. C.; LEE, S.; LEE, M. H. Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus-DP. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 50, n. 4, p. 784–792, 2003.
- LEE, S.-H. Multirate digital control system design and its application to computer disk drives. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 14, n. 1, p. 124–133, 2006.
- LEONESSA, A.; HADDAD, W.; CHELLABOINA, V. Nonlinear system stabilization via hierarchical switching control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 46, n. 1, p. 17–28, 2001.
- LIA, Z.; FANG, H. Fuzzy controller design for networked control system with time-variant delays. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, v. 17, n. 1, p. 172–176, 2006.
- LIAN, F.-L. *Analysis, Design, Modeling, and Control of Networked Control Systems*. Tese (Doutorado) — University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 2001.
- LIBERATONE, V. Integrated play-back, sensing, and networked control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communication - Infocom 06*, p. 1–12, 2006.
- LIU, C. L.; LAYLAND, J. W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment. *Journal of Association for Computing Machinery*, v. 20, n. 1, p. 46–61, 1973.
- LIU, G. P.; MU, J. X.; REES, D.; CHAI, S. C. Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified mpc. *International Journal of Control*, v. 79, n. 4, p. 288 – 297, 2006.
- LIU, G. P.; REES, D. Stability criteria of networked predictive control systems with random network delay. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*, p. 203–208, 2005.
- LIU, G.-P.; XIA, Y.; CHEN, J.; REES, D.; HU, W. Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 3, p. 1282–1297, 2007.
- LIU, G.-P.; XIA, Y.; REES, D.; HU, W. Design and stability criteria of networked predictive control systems with random network delay in the feedback channel. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, v. 37, n. 2, p. 173–184, 2007.
- LIU, H.; WU, F.; SUN, F.; SUN, Z. An improved internal model control algorithm for NCS with networked-delay. *Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, p. 836–840, 2004.

- LOONTANG, P.; SILVA, C. W. de. Compensation for transmission delays in a ethernet-based control network using variable-horizon predictive control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 14, n. 4, p. 707–718, 2006.
- LU, L.; ZHU, S.; MENG, J.; JIANG, Y. Predictive control applied queuing strategy in networked control systems. *Proceedings of the IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, p. 1–5, 2006.
- LUCK, R.; RAY, A. An observer-based compensator for distributed delays. *Automatica*, v. 26, n. 5, p. 903–908, 1990.
- LUO, R. C.; CHEN, T. M. Development of a multibehavior-based mobile robot for remote supervisory control through the Internet. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 5, n. 4, p. 376–385, 2000.
- MARTINS, E. C. *Modelagem e Controle de Dosagens de Produtos Químicos em uma Estação Clássica de Tratamento de Água*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2001.
- MARTINS, E. C.; BATISTA, A. P.; FREITAS, M. E.; JOTA, F. G.; JOTA, P. R. S. Sistema para monitoramento e controle de usos finais. *Anais do VII SINCONEE*, Florianópolis-SC, p. 1–10, 2006.
- MARTINS, E. C.; BATISTA, A. P.; FREITAS, M. E. de A.; JOTA, F. G. Optimization of the operation of an air-conditioning system by means of a distributed control system. *Proceedings of the Building Simulation 2007*, Beijing, China, p. 457–464, 2007.
- MARTINS, E. C.; JOTA, F. G. Design of networked control systems with explicit compensation for time delay variations. *Submetido à publicação no Periódico IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, 2008.
- MARTINS, E. C.; JOTA, F. G. Design of predictive and adaptive networked control system. *Em preparação*, 2009a.
- MARTINS, E. C.; JOTA, F. G. Design of predictive and adaptive networked control system with online parameter estimator. *Em preparação*, 2009b.
- MCCLAMROCH, N.; KOLMANOBSKY, I. Performance benefits of hybrid control design for linear and nonlinear systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 7, p. 1083 – 1096, 2000.
- MIZUOCHI, M.; TSUJI, T.; OHNISHI, K. Multirate sampling method for acceleration control system. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, v. 4, p. 1629–1634, 2005.
- MONTESTRUQUE, L.; ANTSAKLIS, P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 49, n. 9, p. 1562–1572, 2004.
- MONTESTRUQUE, L. A.; ANTSAKLIS, P. J. On the model-based control of networked systems. *Automatica*, v. 30, n. 10, p. 1837–1843, 2003.

- MORARI, M.; ZAFIRIOU, E. *Robust Process Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc., 1989.
- MORSE, A.; MAYNE, D.; GOODWIN, G. Applications of hysteresis switching in parameter adaptative control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 37, n. 9, p. 1343 – 1354, 1992.
- MU, S.; CHU, T.; WANG, L. An improved model-based control scheme for networked systems. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 6131–6136, 2004.
- NESIC, D.; TEEL, A. Input-to-state stability of networked control systems. *Automatica*, v. 40, p. 2121 – 2128, 2004.
- NILSSON, J. *Real-time Control Systems with Delays*. Tese (Doutorado) — Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 1998.
- NILSSON, J.; BERNHARDSSON, B.; WITTENMARK, B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*, v. 34, n. 1, p. 57–64, 1988.
- NILSSON, J.; BERNHARDSSON, B.; WITTENMARK, B. Some topics in real-time control. *Proceedings of the American Control Conference*, v. 4, p. 2386–2390, 1998.
- OORSCHOT, J. van. *Measuring and Modeling Computer Networks*. Tese (Doutorado) — Delft University of Technology, Holanda, 1993.
- PALMOR, Z. J. *Time-delay Compensation - Smith Predictor and its Modifications*. CRC Press: The Control Handbook, pp. 224-237, 1996.
- PENA, P. N. *Aplicação de Técnicas de Controle Chaveado a uma Planta Piloto: Simulação e Implementação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002.
- PEREZ, D.; MORENO, U.; MONTEZ, C. Codesign of CAN networked control systems with remote controllers using jitter margin. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, p. 252–257, 2006.
- PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. *Digital Control System Analysis and Design*. New Jersey, USA: Prentice Hall International, 1995.
- POHJOLA, M. *PID Controller Design in Networked Control Systems*. Dissertação (Mestrado) — HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - Department of Automation and Systems Technology, Helsinque, Finlândia, 2006.
- PREMARATNE, K.; SALVI, R.; HABIB, N. R.; LEGALL, J. Delta-operator formulated discrete-time approximations of continuous-time systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 39, n. 3, p. 581–585, 1994.
- RAGAZZINI, J. R.; FRANKLIN, G. F. *Sampled data control systems*. New York, USA: McGraw-Hill series in Control Systems Engineering, 1958.

- RAPP, T. *Remote Load Control via Powerline and Embedded Webserver*. Karlsruhe, Alemanha: Monografia de Projeto Final de Curso (*Diplomarbeit*), Fachhochschule Karlsruhe, University of Applied Sciences, 2002.
- RAY, A. Introduction to networking for integrated control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 9, n. 1, p. 76–79, 1989.
- RAY, A.; HALEVI, Y. Integrated communication and control systems: Part II Design considerations. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v. 110, n. 4, p. 374–381, 1988.
- SANTOS, D. A. S. e. *Implementação e Análise de Sistema de Monitoramento Remoto*. Belo Horizonte/MG, Brasil: Monografia Projeto Final de Curso - Engenharia de Controle e Automação UFMG, 2004a.
- SANTOS, M. M. D. *Metodologias de Projeto para Sistemas de Controle via Redes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2004b.
- SCHEDL, A. V. *Design and Simulation of Clock Synchronization in Distributed Systems*. Tese (Doutorado) — Technische Universität Wien, Institut für Technische Informatik, Áustria, 1996.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. *Process Dynamics and Control*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1989.
- SHINSKEY, F. G. *Process Control Systems*. New York, USA: McGraw-Hill, 1988.
- SILVA, G. P. *Desenvolvimento de um Sistema para Monitoração e Controle de Processos em Ambiente Distribuído*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.
- SMITH, O. J. M. Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, v. 53, n. 5, p. 217–219, 1957.
- SRINIVASAGUPTA, D.; SCHATTLERB, H.; JOSEPH, B. Time-stamped model predictive control: an algorithm for control of processes with random delays. *Computers & Chemical Engineering*, v. 28, n. 8, p. 1337–1346, 2004.
- TARN, T.-J.; XI, N. Planning and control of Internet-Based teleoperation. *Proceedings of the SPIE: Telem manipulator and Telepresence Technologies V*, v. 3524, p. 189–193, 1998.
- TIAN, E.; YUE, D.; PENG, C. Quantized output feedback control for networked control systems. *Information Sciences*, v. 178, p. 2734–2749, 2008.
- TIAN, Y.-C.; LEVY, D. Compensation for control packet dropout in networked control systems. *Information Sciences*, v. 178, n. 5, p. 1263–1278, 2008.
- TIAN, Y.-C.; YUB, Z.-G.; FIDGE, C. Multifractal nature of network induced time delay in networked control systems. *Physics Letters A*, v. 361, n. 1-2, p. 103–107, 2007.
- TIPSUWAN, Y.; CHOW, M.-Y. Control methodologies in networked control systems. *Control Engineering Practice*, v. 11, n. 10, p. 1099–1111, 2003.

- TIPSUWAN, Y.; CHOW, M.-Y. On the gain scheduling for networked PI controller over IP network. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 9, n. 3, p. 491–498, 2004.
- TIPSUWAN, Y.; CHOW, M.-Y.; VANIJJIRATTIKHAN, R. An implementation of a networked PI controller over IP network. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, v. 3, p. 2805–2810, 2003.
- TIPSWAN, Y.; CHOWN, M.-Y. Network-based controller adaptation based on QoS negotiation and deterioration. *Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, v. 3, p. 1794–1799, 2001.
- TORNGREN, M. Fundamentals of implementing real-time control applications in distributed computer systems. *Real-Time Systems*, n. 14, p. 219–250, 1998.
- VOZDOLSKY, N. O.; DJAFERIS, T. E. Distributed controller design for networked control systems. *Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation*, p. 5011–5016, 2005.
- WALSH, G.; YE, H. Scheduling of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 21, n. 1, p. 57–65, 2001.
- WALSH, G.; YE, H.; BUSHNELL, L. Asymptotic behavior of networked control systems. *Proceedings of the IEEE International Conference*, v. 2, p. 1448–1453, 1999.
- WANG, C.; WANG, Y.; MA, G. Compensation time-varying delays in networked control systems via jump linear system approach. *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control*, p. 1343–1347, 2004.
- WANG, Q.; YI, J.; ZHAO, D.; WU, B. Time delay compensation for networked control systems based on SMC. *Proceedings of the 2004 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, p. 831–835, 2004.
- WANG, S.; XU, B.; WANG, Q. Delays analysis for teleoperation over Internet and Smith predictor with adaptive time-delay control. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, p. 664–669, 2005.
- WANG, Z.; GOLDSMITH, P.; TAN, D. Improvement on robust control of uncertain systems with time-varying input delays. *IET Control Theory Application*, v. 1, n. 1, p. 189–194, 2007.
- WANG, Z.; YANG, J.; TAN, D.; WANG, X. Compensation for the networked control systems with the long time delays. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 3170–3175, 2003.
- WATANABE, K.; ITO, M. A process-model control for linear systems with delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 26, n. 6, p. 1261–1269, 1981.
- WITHEEPHANICH, K.; PIYARAT, W.; TARASANTISUK, C. Representations of robustly stabilizing controller structure for distributed control architectures with plant uncertainties. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, v. 2, p. 1299–1303, 2004.

- WITRANT, E.; GEORGES, D.; WIT, C. C. de. Optimal control design for the stabilization of network controlled systems. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, p. 2777–2782, 2006.
- WU, J.; DENG, F.-Q.; GAO, J.-G. Modeling and stability of long random delay networked control systems. *Proceedings of the 4th International conference on Machine Learning and Cybernetics*, p. 947–952, 2005.
- XIE, G.; WANG, L. Stabilization of networked control systems with time-varying network-induced delay. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, p. 3551–3556, 2004.
- XIONG, Y.-S.; YU, L.; YU, S.-M. Sliding mode multiple steps predictive control for networked control systems. *Control Theory & Applications (China)*, v. 22, n. 2, p. 301–306, 2005.
- YANG, F.; WANG, Z.; HUNG, Y. S.; GANI, M. H_∞ control for networked systems with random communication delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 51, n. 3, p. 511–518, 2006.
- YANG, L.; LI, Y.; YANG, G. Analysis of delay and traffic load in networked control system. *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.*, p. 1425–1430, 2005.
- YANG, L.; YANG, S.-H. Multirate control in Internet-Based control systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, v. 37, n. 2, p. 185–192, 2007.
- YANG, S. H.; CHEN, X.; ALTY, J. L. Design issues and implementation of Internet-based process control. *Control Engineering Practice*, v. 11, p. 709–720, 2003.
- YU, M.; WANG, L.; CHU, T.; XIE, G. Stabilization of networked control systems with data packet dropout and network delays via switching system approach. *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, v. 4, p. 3539–3544, 2004.
- YU, M.; XIE, G.; WANG, L. Stabilization of networked control systems with transmission delays. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v. 2, p. 1764–1769, 2004.
- ZHANG, H.; YANG, D.; CHAI, T. Guaranteed cost networked control for ts fuzzy systems with time delays. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, v. 37, n. 2, p. 160–172, 2007.
- ZHANG, L.; SHI, Y.; CHEN, T.; HUANG, B. A new method for stabilization of networked control systems with random delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 50, n. 8, p. 1177 – 1181, 2005.
- ZHANG, W.; BRANICKY, M.; PHILLIPS, S. Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 21, n. 1, p. 84–99, 2001.
- ZHAO, Y.; LIU, G.; REES, D. Integrated predictive control and scheduling co-design for networked control systems. *IET Control Theory Application*, v. 2, n. 1, p. 7– 15, 2008.

- ZHEN, W.; JIAN-YING, X. Online delay-evaluation control for networked control systems. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, v. 2, p. 1649–1650, 2002.
- ZHONG, Q. *Robust Control of Systems with Delays*. Tese (Doutorado) — Department of Electrical and Electronic Engineering - Imperial College London, England, 2003.
- ZHONG, Q.-C. Implementation of distributed delay in control laws. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 49, n. 11, p. 1–13, 2004.
- ZHONG, Q.-C. On distributed delay in linear control laws - Part I discrete-delay implementations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 49, n. 11, p. 2074–2080, 2004.
- ZHONG, Q.-C. On distributed delay in linear control laws - Part II rational implementations inspired from the delta operator. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 50, n. 5, p. 729–734, 2005.
- ZHONG, Q.-C. *Robust Control of Time-delay Systems*. England: Springer-Verlag, 2006.
- ZHU, Q.; LU, G.; CAO, J.; HU, S. Stability analysis of networked control systems with markov delay. *Proceedings of the International Conference on Control and Automation (ICCA2005)*, p. 720–724, 2005.

APÊNDICE A – Sequência de Mensagens no Controlador

Um exemplo da sequência de mensagens trocadas pela internet entre nó controlador (computador), nó sensor e nó atuador na rede CAN (nível da planta) é mostrado abaixo. È analisado um ciclo de 8 amostragens de cálculo da ação de controle, a uma taxa de 125 ms por amostragem, o que corresponde a um intervalo de 1 segundo.

```

+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 13 = 3,81231671554252
Medida com timestamp = 151
Serial do Controlador MED = 14
Atualizou saida anterior unica 13 = 3,81231671554252
-----
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 14 = 3,51906158357771
Medida com timestamp = 182
Serial do Controlador MED = 15
Atualizou saida anterior unica 14 = 3,51906158357771
-----
Atraso_TCA_Medio= 0,143177135641541
Atraso_TCA_Medio= 0,206599930996817
Atraso_TCA_Medio= 0,186578089300921
Atraso_TCA_Medio= 0,201062041404704
Atraso_TCA_Medio= 0,193051239752538
---Ligou Controlador---
-----Amostragem calcula AC-----
Saida anterior usada na estimação da saida 15 = 3,51906158357771
AC usada na estimação = 0

```

```
Estimou saida intermediaria 15 = 3,35933075572454
AC usada na estimação = 0
Estimou saida 15 PV[k] = 3,23172717128415
Saida anterior usada na estimação da saida 16 = 3,23172717128415
AC usada na estimação = 0
Estimou saida intermediaria 16 = 3,08503850323874
AC usada na estimação = 0
Estimou saida 16 PV[k] = 2,96785386148262
Erro de numero 15 = 6,76827282871585
Erro de numero 14 = 0
AC com Serial 15 = 35,2513984219856
***** Enviou AC para o atuador
-----
-----Amostragem calcula AC-----
Saida anterior usada na estimação da saida 16 = 2,96785386148262
AC usada na estimação = 0
Estimou saida intermediaria 16 = 2,83314244965223
AC usada na estimação = 0
Estimou saida 16 PV[k] = 2,72552603492743
Saida anterior usada na estimação da saida 17 = 2,72552603492743
AC usada na estimação = 0
Estimou saida intermediaria 17 = 2,60181392601579
AC usada na estimação = 35,2513984219856
Estimou saida 17 PV[k] = 3,84200261689582
Erro de numero 16 = 7,27447396507257
Erro de numero 15 = 6,76827282871585
AC com Serial 16 = 40,7079295433192
***** Enviou AC para o atuador
-----
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 15 = 0
Medida com timestamp = 32
Estimou saida intermediaria 16 = 0
AC usada na estimação = 0
AC usada na estimação = 0
```

```
Rodou Atualiza saida 16 saida ant = 0
-----
-----Amostragem calcula AC-----
Saida anterior usada na estimação da saida 17 = 0
AC usada na estimação = 0
Estimou saida intermediaria 17 = 0
AC usada na estimação = 35,2513984219856
Estimou saida 17 PV[k] = 1,33901813255998
Saida anterior usada na estimação da saida 18 = 1,33901813255998
AC usada na estimação = 35,2513984219856
Estimou saida intermediaria 18 = 2,87830707350384
AC usada na estimação = 40,7079295433192
Estimou saida 18 PV[k] = 4,31525859039426
Erro de numero 17 = 8,66098186744002
Erro de numero 16 = 7,27447396507257
AC com Serial 17 = 50,9603025687438
***** Enviou AC para o atuador
-----
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 16 = 0
Medida com timestamp = 64
Estimou saida intermediaria 17 = 0
AC usada na estimação = 0
AC usada na estimação = 35,2513984219856
Rodou Atualiza saida 17 saida ant = 1,33901813255998
-----
*****Chegou ACK*****
Chegou ACK= 15
Timestamp do Ack= 85
Timestamp da medida= 32
TCA Atual= 0,206
Calculou TCA medio= 0,194346115777285
TCA medio inteiro vale= 1
TCA medio fracionario vale= 0,0693461157772845
-----
```

```
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 17 = 1,27077223851417
Medida com tickstamp = 95
Atualizou saida anterior unica 17 = 1,27077223851417
-----
-----Amostragem calcula AC-----
Saida anterior usada na estimação da saida 18 = 1,27077223851417
AC usada na estimação = 35,2513984219856
Estimou saida intermediaria 18 = 2,8425073383291
AC usada na estimação = 40,7079295433192
Estimou saida 18 PV[k] = 4,24811500656408
Saida anterior usada na estimação da saida 19 = 4,24811500656408
AC usada na estimação = 40,7079295433192
Estimou saida intermediaria 19 = 5,93452213546021
AC usada na estimação = 50,9603025687438
Estimou saida 19 PV[k] = 7,60593046949821
Erro de numero 18 = 5,75188499343592
Erro de numero 17 = 8,66098186744002
AC com Serial 18 = 39,4174507518495
***** Enviou AC para o atuador
-----
-----Amostragem calcula AC-----
Saida anterior usada na estimação da saida 19 = 7,60593046949821
AC usada na estimação = 40,7079295433192
Estimou saida intermediaria 19 = 9,13702567467346
AC usada na estimação = 50,9603025687438
Estimou saida 19 PV[k] = 10,6895534239949
Saida anterior usada na estimação da saida 20 = 10,6895534239949
AC usada na estimação = 50,9603025687438
Estimou saida intermediaria 20 = 12,552230985759
AC usada na estimação = 39,4174507518495
Estimou saida 20 PV[k] = 13,549498590689
Erro de numero 19 = -0,689553423994924
Erro de numero 18 = 5,75188499343592
```

```
AC com Serial 19 = 8,26489420055697
***** Enviou AC para o atuador
-----
*****Chegou ACK*****
Chegou ACK= 16
Tickstamp do Ack= 118
Tickstamp da medida= 64
TCA Atual= 0,21
Calculou TCA medio= 0,195911504199556
TCA medio inteiro vale= 1
TCA medio fracionario vale= 0,0709115041995561
-----
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 18 = 4,39882697947214
Medida com tickstamp = 126
Estimou saida intermediaria 19 = 6,11617394312402
AC usada na estimacão = 40,7079295433192
AC usada na estimacão = 50,9603025687438
Rodou Atualiza saida 19 saida ant = 7,73401676883924
-----
*****Chegou ACK*****
Chegou ACK= 17
Tickstamp do Ack= 150
Tickstamp da medida= 95
TCA Atual= 0,214
Calculou TCA medio= 0,1977203537796
TCA medio inteiro vale= 1
TCA medio fracionario vale= 0,0727203537796005
-----
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 19 = 8,01564027370479
Medida com tickstamp = 157
Atualizou saida anterior unica 19 = 8,01564027370479
-----
*****Chegou ACK*****
```

```
Chegou ACK= 18
Tickstamp do Ack= 181
Tickstamp da medida= 126
TCA Atual= 0,214
Calculou TCA medio= 0,19934831840164
TCA medio inteiro vale= 1
TCA medio fracionario vale= 0,0743483184016404
```

```
-----
+++++++Chegou Medida+++++++
Chegou Medida = 20 = 11,5347018572825
Medida com tickstamp = 189
```

```
-----Amostragem calcula AC-----
Usou medida real n20 = 11,5347018572825
Erro de numero 20 = -1,5347018572825
Erro de numero 19 = -0,689553423994924
AC com Serial 20 = 3,57577293137055
***** Enviou AC para o atuador
```

```
-----Amostragem calcula AC-----
Saida anterior usada na estimação da saida 21 = 11,5347018572825
AC usada na estimação = 39,4174507518495
Estimou saida intermediaria 21 = 12,9174165309309
AC usada na estimação = 8,26489420055697
Estimou saida 21 PV[k] = 12,7602325917661
Saida anterior usada na estimação da saida 22 = 12,7602325917661
AC usada na estimação = 8,26489420055697
Estimou saida intermediaria 22 = 12,5373072847943
AC usada na estimação = 3,57577293137055
Estimou saida 22 PV[k] = 12,2345447893978
Erro de numero 21 = -2,76023259176611
Erro de numero 20 = -1,5347018572825
AC com Serial 21 = 0
***** Enviou AC para o atuador
```

*****Chegou ACK*****

Chegou ACK= 19

Tickstamp do Ack= 218

Tickstamp da medida= 157

TCA Atual= 0,238

Calculou TCA medio= 0,203213486561476

TCA medio inteiro vale= 1

TCA medio fracionario vale= 0,0782134865614764

+++++++Chegou Medida+++++++

Chegou Medida = 21 = 13,6852394916911

Medida com tickstamp = 220

Atualizou saida anterior unica 21 = 13,6852394916911

-----Amostragem calcula AC-----

Saida anterior usada na estimação da saida 22 = 13,6852394916911

AC usada na estimação = 8,26489420055697

Estimou saida intermediaria 22 = 13,4024687745988

AC usada na estimação = 3,57577293137055

Estimou saida 22 PV[k] = 13,0958109642361

Saida anterior usada na estimação da saida 23 = 13,0958109642361

AC usada na estimação = 3,57577293137055

Estimou saida intermediaria 23 = 12,599165854615

AC usada na estimação = 0

Estimou saida 23 PV[k] = 12,20598866922

Erro de numero 22 = -3,09581096423609

Erro de numero 21 = -2,76023259176611

AC com Serial 22 = 0

***** Enviou AC para o atuador

APÊNDICE B – Programas em Pascal para os Algoritmos Utilizados na Estratégia de Controle Proposta

Este apêndice apresenta alguns trechos do programa CONTROLADOR em Pascal (Delphi). Esse programa foi utilizado para desenvolvimento e testes do Sistema de Controle Preditivo e Adaptativo via Redes.

B.1 Algoritmo de Sincronização

Envio da Mensagem para Determinação do atraso T_{CA} (*LIVE_ ACK_ MSG*)

```

procedure TForm1.ButtonMsgTesteClick(Sender: TObject);
//Botao Envia Mensagem LIVE_ACK_MSG da Estacao Remota para a Local
var
  vetor\_msg : array [0..5] of byte;
  StrTickEnvia : string;
  k : byte;

begin
  vetor_msg[0] := 12;           //sidh
  vetor_msg[1] := 0;           //sidl
  vetor_msg[2] := 3;           //dlc
  vetor_msg[3] := 1;           //remetente=gateway=1
  vetor_msg[4] := serialIdle;   //serial
  vetor_msg[5] := 112;         //reqID=0x70 = 112

  try

```

```

    CMUFLClient.WriteBuffer(vetor_msg, sizeof(vetor_msg), true);
    QueryPerformanceCounter(TickEnvia);
    StrTickEnvia := IntToStr(TickEnvia);
    memServidor.Lines.Add('Mensagem Testa Delay enviada');
    serialIdle := serialIdle + 1;
end;

```

Recepção da Mensagem de Retorno para Determinação do atraso T_{CA} (*ACK-LIVE*)

```

procedure TForm1.TrataFrame(Vbytes: TByteArr; AThread: TIdPeerThread);
//Chegou Mensagem na Estacao Remota
var
    k: byte;
    m, n, na: integer;
    Amostra_Vazia : boolean;
    CalcInterm1, CalcInterm2, CalcInterm3, CalcInterm4, Valor_Anterior,
    Instante_Anterior: extended;
    msgRecebidaStrg: string;
    Remetente, Serial, ReqIDTipo, CanalMSB, LSBMedida, Tickstamp : Byte;
    StrIDFuncao, StrTamanho, StrRemetente, StrSerial, StrReqIDTipo,
    StrCanalMSB, StrLSBMedida, StrTickstamp, StrMedida, StrTickRecebe,
    StrTickMedida : String;

begin
    try
        QueryPerformanceCounter(TickMedida);
        //Associa cada byte do frame ao seu significado
        Remetente := Vbytes[0];
        Serial := Vbytes[1];
        ReqIDTipo := Vbytes[2];
        CanalMSB := Vbytes[3];
        LSBMedida := Vbytes[4];
        Tickstamp := Vbytes[5];

        //Calcula a Medida contida nos bytes LSBMedida e MSBMedida
        Medida := (CanalMSB and 3) shl 8 or LSBMedida;

        //Passa para string todos os bytes

```

```
StrIDFuncao := '9';//CurrToStr(IDFuncao);
StrTamanho := '6';//CurrToStr(Tamanho);
StrRemetente := CurrToStr(Remetente);
StrSerial := CurrToStr(Serial);
StrReqIDTipo := CurrToStr(ReqIDTipo);
StrCanalMSB := CurrToStr(CanalMSB);
StrLSBMedida := CurrToStr(LSBMedida);
StrTickstamp := CurrToStr(Tickstamp);
StrMedida := CurrToStr(Medida);
StrTickMedida := IntToStr(TickMedida);
.
.
.
if (Remetente = 12)and(ControladorAuto = 0)and(ReqIDTipo = 11)then
//Mensagem identificada como ACK_ LIVE
begin
    QueryPerformanceCounter(TickRecebe);
    StrTickRecebe := IntToStr(TickRecebe);
    CalculaTick := ((TickRecebe-TickEnvia)/(2 * Frequencia));
    TabelaDelta.Lines.Add(FloatToStr(CalculaTick));
    DeltaTick := DeltaTick + CalculaTick;
    delay := DeltaTick/NTestaDelay;
    Atraso_TCA_Medio := delay;
    NTestaDelay := NTestaDelay + 1;
    Atraso_TCA_Medio_Int := round(Int(Atraso_TCA_Medio/Tamost));
    Atraso_TCA_Medio_Frac := (Frac(Atraso_TCA_Medio/Tamost))*Tamost;
    MostraDelta.Text := FloatToStr(delay);
    Atraso_TCA_Medio_Int_Inicial := Atraso_TCA_Medio_Int;
end;
.
.
.
end;
```

B.2 Algoritmo de Estimaco de Parmetros online - MQR, com Fatoraco U-D

```

procedure TForm1.TrataFrame(Vbytes: TByteArr; AThread: TIdPeerThread);
//Chegou Mensagem na Estacao Remota
var
  k: byte;
  m, n, na, q: integer;
  Amostra_Vazia : boolean;
  CalcInterm1, CalcInterm2, CalcInterm3, CalcInterm4, Valor_Anterior,
  Instante_Anterior: extended;
  msgRecebidaStrg: string;
  Remetente, Serial, ReqIDTipo, CanalMSB, LSBMedida, Tickstamp : Byte;
  StrIDFuncao, StrTamanho, StrRemetente, StrSerial, StrReqIDTipo,
  StrCanalMSB, StrLSBMedida, StrTickstamp, StrMedida, StrTickRecebe,
  StrTickMedida : String;

begin
  try
    .
    .
    .
    if (Remetente = 12) and (ReqIDTipo = 2) then
      //Mensagem identificada como CHEGOU_MEDIDA
      begin
        .
        .
        .
        //Mensagem de controle
        ValorMedida := (StrToInt(StrMedida))+(256*(StrToInt(StrCanalMSB)));
        Vetor_Medida[serial] := ValorMedida/10.23;
        Instante_Medida[serial] := serial*Tamost;
        SerialMedida := serial;
        Tickstamp_Medida[SerialMedida] := Tickstamp;
        if (ControladorAuto = 1) then
          begin
            //Calculo dos parametros do modelo para o intervalo anterior (k-1)
            Valor_Anterior := Vetor_Medida[lo(serial-2)];

```

```

Instante_Anterior := 0;
//instante relativo da medicao do Valor_Anterior no período.
Amostra_Vazia := true;
Acao_media[lo(serial-1)] := 0; //Ac med no intervalo analisado
for m:=Serial-20 to Serial do
begin
if (Janela_ACK[lo(m)]=(lo(Serial-1)))and(Chegou_ACK[lo(m)]=true)then
//verifica se ACK esta na janela anterior
begin
//Calcula o novo valor Parcial que passa a ser Valor_anterior
Valor_anterior := ((1-((Atraso_TCA_Frac[lo(m)]-Instante_Anterior)
/Tau))*Valor_Anterior)+((1/Tau)*(Atraso_TCA_Frac[lo(m)]-
Instante_Anterior)*Ganho*Sinal_Controlo[lo(m-1)]);
Acao_media[lo(serial-1)] := Acao_media[lo(serial-1)]
+(AC_Anterior*(Atraso_TCA_Frac[lo(m)]-Instante_Anterior)/Tamost);
AC_Anterior := Sinal_Controlo[lo(m)];
Instante_Anterior := Atraso_TCA_Frac[lo(m)]; //Nova ref. de tempo
Serial_AC_Anterior := lo(m);
Amostra_Vazia := false;
end;
end;
Acao_media[lo(serial-1)] := Acao_media[lo(serial-1)] + (AC_Anterior*
(Tamost-Instante_Anterior)/Tamost);
//Se o intervalo tem a mostragem vazia...:
if (Amostra_Vazia = true) then
begin
Amostra_Vazia := false;
end;

if conta>1+Atraso_TCA_Medio_Int+tempomorto then
begin
Y := Vetor_Medida[lo(Serial-1-Atraso_TCA_Medio_Int_Inicial)];
X[1] := Vetor_Medida[lo(Serial-2-Atraso_TCA_Medio_Int_Inicial)];
X[2] := Acao_media[lo(Serial-2-tempomorto-
Atraso_TCA_Medio_Int_Inicial)];
fi[1] := X[1];
fi[2] := X[2];
n:=2; //dimensao das marizes P, U e D

```

```

na:=1 ;

//Algoritmo Bierman and Thornton

    perr:=Y;
    for i:=1 to n do perr:=perr-Teta[i]*fi[i];
    {Calculo ganho Kalman e Matriz de Cov. + fat. U-D}
    fj:=fi[1];
    vj:= diag[1]*fj;
Matriz_K[1]:=vj;
    alphaj:= R + vj*fj;
    diag[1]:= diag[1]/alphaj/lambda;

if n>1 then
begin
kf:=0;
ku:=0;
for j:= 2 to n do
    begin
fj:=fi[j];
for q:=1 to j-1 do
begin {f = fi*U}
kf:= kf+ 1;

                fj:= fj +fi[q]*offdiag[kf];
                end; {q}
vj:= fj*diag[j]; {v = D*f}
                Matriz_K[j]:= vj;
                ajlast:=alphaj;
                alphaj:= ajlast+vj*fj;
                diag[j]:= diag[j]*ajlast/alphaj/lambda;
                pj:= -fj/ajlast;
                for q:=1 to j-1 do
begin
{kj + 1: = kj +vj*uj}
{uj:=uj+pj*kj}
ku:= ku + 1;

                w:= offdiag[ku] + Matriz_K[q]*pj;
                Matriz_K[q]:= Matriz_K[q] + offdiag[ku]*vj;

```

```

        offdiag[ku]:=w;
    end; {q}

end; {j}
end; {n>1}
{Atualizacao dos parametros estimados}
for q:=1 to n do Teta[q]:=Teta[q]+ perr*Matriz_K[q]/alphaj;
{atualizacao de Teta}

// Atualização de Tau e ganho com 200 amostras
    if conta>=200 then
        begin
            Tau := -Tamost/ln(Teta[1]);
            Ganho := Teta[2]/(1-Teta[1]);
        end;

    if conta<200 then
        begin
            conta:=conta+1;
        end;
//-----FIM do MQR-----

.
.
.
end;
end;
```

B.3 Algoritmo de Estimação, em Delta, para Valores de Saída da Planta 2

```

procedure TForm1.ControladorTimeDriven(Sender: TObject);
//Calcula Sinal de Controle - disparo por tempo

begin
    memServidor.Lines.Add('Controlador no modo AUTOMATICO');
    memServidor.Lines.Add('Disparou controlador por tempo');
    TempDelta.Enabled := false;
```

```

    Timer1.Enabled := true;
    Timer1.Interval := Tamost*1000; //Tamost em milisegundos
    Timer1.OnTimer := RodaControladorTimeDriven;
end;

```

```

procedure TForm1.RodaControladorTimeDriven(Sender: TObject);
var
    IntMV: integer;
    AcaoControle1, AcaoControle2, k : Byte;
    StrSerial, StrAC, StrTickEnvia : String;
    vetor_msgDT : array [0..6] of byte;

begin
    .
    .
    .
    // Estimacao da saída
    if (SerialMedida < serialControlador) then
    begin
        for k:=serialControlador to lo(serialControlador
            +Atraso_TCA_Medio_Int) do
        begin
            Saida_Interna[k] := ((1-((1/Tau)*Atraso_TCA_Medio_Frac))
                *saida_anterior_loop)+((1/Tau)*Atraso_TCA_Medio_Frac
                *Ganho*Sinal_Controlo[lo(k-2-Atraso_TCA_Medio_Int)]);
            //esse valor representa a saida intermediaria

            Saida_Estimada[k] := ((1-((1/Tau)*(Tamost-Atraso_TCA_Medio_Frac)))
                *Saida_Interna[k])+((1/Tau)*(Tamost-Atraso_TCA_Medio_Frac)
                *Ganho*Sinal_Controlo[lo(k-1-Atraso_TCA_Medio_Int)]);
            //esse valor representa a saida ao final do periodo

            saida_anterior_loop := Saida_Estimada[k];
            //a ser utilizada no estimador em k+1

            PV[k] := Saida_Estimada[k];
        end;
    end;

```

```
end

else //sistema sem atraso: nao precisa estimar
begin
  PV[serialControlador] := ValorMedida / 10.23;
  saida_anterior := PV[serialControlador];
  //a ser utilizada no estimador em k+1
  saida_anterior_loop := saida_anterior;
end;
// Final da Estimacao
.
.
.
end;
```

B.4 Algoritmo de Atualização da Estimação, em Delta, para Valores de Saída da Planta 2

```
procedure TForm1.TrataFrame(Vbytes: TByteArr; AThread: TIdPeerThread);
//Chegou Mensagem na Estacao Remota
var
  k: byte;
  m, n, na: integer;
  Amostra_Vazia : boolean;
  CalcInterm1, CalcInterm2, CalcInterm3, CalcInterm4, Valor_Anterior,
  Instante_Anterior: extended;
  msgRecebidaStrg: string;
  Remetente, Serial, ReqIDTipo, CanalMSB, LSBMedida, Tickstamp : Byte;
  StrIDFuncao, StrTamanho, StrRemetente, StrSerial, StrReqIDTipo,
  StrCanalMSB, StrLSBMedida, StrTickstamp, StrMedida, StrTickRecebe,
  StrTickMedida : String;

begin
  try
    .
    .
    .
```

```

if (Remetente = 12) and (ReqIDTipo = 2) then
//Mensagem identificada como CHEGOU_MEDIDA
begin
.
.
.
//Atualizacao da estimacao com a chegada de medida
if ((serialControlador - SerialMedida) > 1) then
begin
saida_anterior_loop := ValorMedida/10.23;
for k := SerialMedida+1 to serialControlador-1 do
begin
Saida_Interna[k] := ((1-(Atraso_TCA_Medio_Frac/Tau))
*saida_anterior_loop)+((1/Tau)*Atraso_TCA_Medio_Frac
*Ganho*Sinal_Controlo[lo(k-2-Atraso_TCA_Medio_Int)]);

Saida_Estimada[k] := ((1-((1/Tau)*(Tamost-Atraso_TCA_Medio_Frac)))
*Saida_Interna[k])+((1/Tau)*(Tamost-Atraso_TCA_Medio_Frac)
*Ganho*Sinal_Controlo[lo(k-1-Atraso_TCA_Medio_Int)]);

saida_anterior_loop := Saida_Estimada[k];
//a ser utilizada no estimador em k+1
end;
end;
.
.
.
end;
end;

```

B.5 Algoritmo para o Cálculo da Ação de Controle - Controlador PI em z para controle da Planta 2, com $h=125$ ms

```

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
//Botao Liga Controlador Remoto
var

```

```

vetor_msg : array [0..6] of byte;
vetor_msg1 : array [0..6] of byte;
vetor_msg2 : array [0..6] of byte;

begin
  vetor_msg[0] := 12;           //sidH
  vetor_msg[1] := 0;           //sidL
  vetor_msg[2] := 4;           //DLC
  vetor_msg[3] := 1;           //remetente=gateway=1
  vetor_msg[4] := serialSensor; //serial
  vetor_msg[5] := 64;           //Request ID 0x40=64
  vetor_msg[6] := 1;           //Ativa=1
  //Broadcast - sincroniza placas Locais

  vetor_msg1[0] := 255;        //sidH
  vetor_msg1[1] := 224;        //sidL
  vetor_msg1[2] := 3;          //DLC
  vetor_msg1[3] := 1;          //remetente=0
  vetor_msg1[4] := 0;          //serial
  vetor_msg1[5] := 0;          //Request ID
  //Liga Controlador Remoto

  vetor_msg2[0] := 1;          //sidH
  vetor_msg2[1] := 0;          //sidL
  vetor_msg2[2] := 3;          //DLC
  vetor_msg2[3] := 1;          //remetente=1
  vetor_msg2[4] := 0;          //serial
  vetor_msg2[5] := 105;        //Request ID+hab=01101xx1
  //Liga Placa Medicao

  try
    CMUFCClient.WriteBuffer(vetor_msg1, sizeof(vetor_msg1), true);
    CMUFCClient.WriteBuffer(vetor_msg2, sizeof(vetor_msg2), true);
    CMUFCClient.WriteBuffer(vetor_msg, sizeof(vetor_msg), true);
    MensagensDebug.Add('%---Ligou Controlador---');
    conta := 0;
    memServidor.Lines.Add('Mensagem Broadcast enviada');
    memServidor.Lines.Add('Mensagem Habilita Sensor enviada');
  end try
end

```

```

    serialSensor := serialSensor + 1;
    memServidor.Lines.Add('Contando Atraso de Envio (delta/2)');
    TempDelta.Enabled := true;
    TempDelta.Interval := trunc((delay*1000)+9.4);
    ControladorAuto := 1;
    TempDelta.OnTimer := ControladorTimeDriven;
end;

procedure TForm1.ControladorTimeDriven(Sender: TObject);
//Calcula Sinal de Controle - disparo por tempo
begin
    memServidor.Lines.Add('Controlador no modo AUTOMATICO');
    memServidor.Lines.Add('Disparou controlador por tempo');
    TempDelta.Enabled := false;
    Timer1.Enabled := true;
    Timer1.Interval := Tamost*1000; //Tamost em milisegundos
    Timer1.OnTimer := RodaControladorTimeDriven;
end;

procedure TForm1.RodaControladorTimeDriven(Sender: TObject);
var
    IntMV: integer;
    AcaoControle1, AcaoControle2, k : Byte;
    StrSerial, StrAC, StrTickEnvia : String;
    vetor_msgDT : array [0..6] of byte;

begin
    MensagensDebug.Add('%-----Amostragem calcula AC-----');
    .
    .
    .
    Erro[serialControlador]:=Setpoint - PV[serialControlador];
    Erro_menos_um[serialControlador]:=Setpoint-PV[lo(serialControlador-1)];
    Sinal_Control[serialControlador]:=(5.20833 * Erro[serialControlador])
    -(4.79167 * Erro_menos_um[serialControlador]) + Sinal_Control[lo
(serialControlador-1)];

```

```

if Sinal_Control[e[serialControlador] > 100 then
  Sinal_Control[e[serialControlador] := 100;
if Sinal_Control[e[serialControlador] < 0 then
  Sinal_Control[e[serialControlador] := 0;
MDeKF := Sinal_Control[e[serialControlador] * 10.23;
MV := MDeKF;
IntMV := Trunc(MV);
StrAC := IntToStr(IntMV);

//Calcula primeira parte da acao de controle
AcaoControle1 := (IntMV and 3) or 56; //56=00111_00 Reqid=7
vetor_msgDT[5] := AcaoControle1;

//Calcula segunda parte da acao de controle
AcaoControle2 := (IntMV and 1020) shr 2;
vetor_msgDT[6] := AcaoControle2;
CMUFClient.WriteBuffer(vetor_msgDT, sizeof(vetor_msgDT), true);
if not(CMUFClient.Connected) then Timer1.Enabled := false;
QueryPerformanceCounter(TickEnvia);
StrTickEnvia := IntToStr(TickEnvia);
StrSerial := IntToStr(serialControlador);
serialControlador := serialControlador + 1;
.
.
.
end;

procedure TForm1.TrataFrame(Vbytes: TByteArr; AThread: TIdPeerThread);
//Chegou Mensagem na Estacao Remota
var
  k: byte;
  m, n, na: integer;
  Amostra_Vazia : boolean;
  CalcInterm1, CalcInterm2, CalcInterm3, CalcInterm4, Valor_Anterior,
  Instante_Anterior: extended;
  msgRecebidaStrg: string;
  Remetente, Serial, ReqIDTipo, CanalMSB, LSBMedida, Tickstamp : Byte;

```

```
StrIDFuncao, StrTamanho, StrRemetente, StrSerial, StrReqIDTipo,  
StrCanalMSB, StrLSBMedida, StrTickstamp, StrMedida, StrTickRecebe,  
StrTickMedida : String;
```

```
begin
```

```
try
```

```
.  
. .  
.
```

```
if (Remetente = 11) and (ControladorAuto = 1) then
```

```
//Mensagem identificada como CHEGOU_ACK
```

```
begin
```

```
QueryPerformanceCounter(TickRecebe);
```

```
StrTickRecebe := IntToStr(TickRecebe);
```

```
//Calculo do atraso TCA para esta acao de controle
```

```
Tickstamp_AC[Serial] := CanalMSB;
```

```
Chegou_ACK[Serial] := true;
```

```
Chegou_ACK[lo(Serial-30)] := false;
```

```
Chegou_ACK[lo(Serial-31)] := false;
```

```
if Tickstamp_AC[Serial] > Tickstamp_Medida[Serial] then
```

```
begin
```

```
Atraso_TCA[Serial] := ((Tickstamp_AC[Serial]
```

```
-Tickstamp_Medida[Serial]-1)*0.004)-0.006;
```

```
end;
```

```
if Tickstamp_AC[Serial] < Tickstamp_Medida[Serial] then
```

```
begin
```

```
Atraso_TCA[Serial] := (((250+Tickstamp_AC[Serial])
```

```
-Tickstamp_Medida[Serial]-1)*0.004)-0.006;
```

```
end;
```

```
//Medicao do atraso e analise temporal do atraso em relacao a medida
```

```
Atraso_TCA_Atual := Atraso_TCA[Serial];
```

```
Atraso_TCA_Int[Serial] := round(Int(Atraso_TCA_Atual/Tamost));
```

```
Atraso_TCA_Frac[Serial] := (Frac(Atraso_TCA_Atual/Tamost))*Tamost;
```

```
Instante_Sinal_Control[serial] := (serial*Tamost)+Atraso_TCA_Atual;

if Instante_Sinal_Control[serial] > 32 then
begin
  Instante_Sinal_Control[serial] :=
  Instante_Sinal_Control[serial]-32;
end;

Janela_ACK[Serial]:=Trunc(Instante_Sinal_Control[serial]/Tamost)+1;

// Calculo do tempo de atraso TCA médio
Atraso_TCA_Medio := (0.9*Atraso_TCA_Medio)+(0.1*Atraso_TCA_Atual);
Atraso_TCA_Medio_Int := round(Int(Atraso_TCA_Medio/Tamost));
Atraso_TCA_Medio_Frac := (Frac(Atraso_TCA_Medio/Tamost))*Tamost;
end;
.
.
.
end;
```

B.6 Algoritmo para o Cálculo da Ação de Controle - Controlador PI com Preditor de Smith para controle da Planta STI

```
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
//Botao Liga Controlador Remoto
var
  vetor_msg : array [0..6] of byte;
  vetor_msg1 : array [0..6] of byte;
  vetor_msg2 : array [0..6] of byte;

begin
  vetor_msg[0] := 12;           //sidH
  vetor_msg[1] := 0;           //sidL
  vetor_msg[2] := 4;           //DLC
  vetor_msg[3] := 1;           //remetente=gateway=1
  vetor_msg[4] := serialSensor; //serial
```

```

vetor_msg[5] := 64;           //Request ID 0x40=64
vetor_msg[6] := 1;           //Ativa=1
//Broadcast - sincroniza placas Locais

vetor_msg1[0] := 255;        //sidH
vetor_msg1[1] := 224;        //sidL
vetor_msg1[2] := 3;          //DLC
vetor_msg1[3] := 1;          //remetente=0
vetor_msg1[4] := 0;          //serial
vetor_msg1[5] := 0;          //Request ID
//Liga Controlador Remoto

vetor_msg2[0] := 1;          //sidH
vetor_msg2[1] := 0;          //sidL
vetor_msg2[2] := 3;          //DLC
vetor_msg2[3] := 1;          //remetente=1
vetor_msg2[4] := 0;          //serial
vetor_msg2[5] := 105;        //Request ID+hab=01101xx1
//Liga Placa Medicao

try
  CMUFLClient.WriteBuffer(vetor_msg1, sizeof(vetor_msg1), true);
  CMUFLClient.WriteBuffer(vetor_msg2, sizeof(vetor_msg2), true);
  CMUFLClient.WriteBuffer(vetor_msg, sizeof(vetor_msg), true);
  MensagensDebug.Add('%---Ligou Controlador----');
  conta := 0;
  memServidor.Lines.Add('Mensagem Broadcast enviada');
  memServidor.Lines.Add('Mensagem Habilita Sensor enviada');
  serialSensor := serialSensor + 1;
  memServidor.Lines.Add('Contando Atraso de Envio (delta/2)');
  TempDelta.Enabled := true;
  TempDelta.Interval := trunc((delay*1000)+9.4);
  ControladorAuto := 1;
  TempDelta.OnTimer := ControladorTimeDriven;
end;

procedure TForm1.ControladorTimeDriven(Sender: TObject);

```

```

//Calcula Sinal de Controle - disparo por tempo
begin
  memServidor.Lines.Add('Controlador no modo AUTOMATICO');
  memServidor.Lines.Add('Disparou controlador por tempo');
  TempDelta.Enabled := false;
  Timer1.Enabled := true;
  Timer1.Interval := Tamost*1000; //Tamost em milisegundos
  Timer1.OnTimer := RodaControladorTimeDriven;
end;

procedure TForm1.RodaControladorTimeDriven(Sender: TObject);
var
  IntMV: integer;
  AcaoControle1, AcaoControle2, k : Byte;
  StrSerial, StrAC, StrTickEnvia : String;
  vetor_msgDT : array [0..6] of byte;

begin
  MensagensDebug.Add('%-----Amostragem calcula AC-----');
  .
  .
  .
  valorf[SerialControlador]:=PV[lo(SerialControlador-1)]-
  valorb[lo(SerialControlador-1)];
  Erro[SerialControlador] := Setpoint - valorf[SerialControlador];
  proporcional[SerialControlador] := Erro[SerialControlador]*ganhokp;
  integral[SerialControlador]:=Sinal_Controlre[lo(SerialControlador-1)]
  -(beta*Sinal_Controlre[lo(SerialControlador-1)])
  +(beta*integral[lo(SerialControlador-1)]);
  valorp[SerialControlador]:=proporcional[SerialControlador]
  +integral[SerialControlador];
  Sinal_Controlre[SerialControlador]:=valorp[SerialControlador];

  //Acao anti windup
  if Sinal_Controlre[SerialControlador] > 100 then
    Sinal_Controlre[SerialControlador] := 100;
  if Sinal_Controlre[SerialControlador] < 0 then

```

```

    Sinal_Controlre[SerialControlador] := 0;

    valora[SerialControlador]:=integral[lo(SerialControlador-tempomorto)]
    -integral[SerialControlador];
    valorb[SerialControlador]:=valora[SerialControlador]*ganhosmith;

    //Inverte sinal para a valvula do STI:
    Saida_analogica[SerialControlador] := 100
    -Sinal_Controlre[SerialControlador];

    MDeKF := Sinal_Controlre[serialControlador] * 10.23;
    MV := MDeKF;
    IntMV := Trunc(MV);
    StrAC := IntToStr(IntMV);

    //Calcula primeira parte da acao de controle
    AcaoControle1 := (IntMV and 3) or 56; //56=00111_00 Reqid=7
    vetor_msgDT[5] := AcaoControle1;

    //Calcula segunda parte da acao de controle
    AcaoControle2 := (IntMV and 1020) shr 2;
    vetor_msgDT[6] := AcaoControle2;
    CMUFClient.WriteBuffer(vetor_msgDT, sizeof(vetor_msgDT), true);
    if not(CMUFClient.Connected) then Timer1.Enabled := false;
    QueryPerformanceCounter(TickEnvia);
    StrTickEnvia := IntToStr(TickEnvia);
    StrSerial := IntToStr(serialControlador);
    serialControlador := serialControlador + 1;
    .
    .
    .
end;

procedure TForm1.TrataFrame(Vbytes: TByteArr; AThread: TIdPeerThread);
//Chegou Mensagem na Estacao Remota
var
    k: byte;

```

```
m, n, na: integer;
Amostra_Vazia : boolean;
CalcInterm1, CalcInterm2, CalcInterm3, CalcInterm4, Valor_Anterior,
Instante_Anterior: extended;
msgRecebidaStrg: string;
Remetente, Serial, ReqIDTipo, CanalMSB, LSBMedida, Tickstamp : Byte;
StrIDFuncao, StrTamanho, StrRemetente, StrSerial, StrReqIDTipo,
StrCanalMSB, StrLSBMedida, StrTickstamp, StrMedida, StrTickRecebe,
StrTickMedida : String;

begin
  try
    .
    .
    .

    if (Remetente = 11) and (ControladorAuto = 1) then
      //Mensagem identificada como CHEGOU_ACK
      begin
        QueryPerformanceCounter(TickRecebe);
        StrTickRecebe := IntToStr(TickRecebe);

        //Calculo do atraso TCA para esta acao de controle
        Tickstamp_AC[Serial] := CanalMSB;
        Chegou_ACK[Serial]:= true;
        Chegou_ACK[lo(Serial-30)]:= false;
        Chegou_ACK[lo(Serial-31)]:= false;

        if Tickstamp_AC[Serial] > Tickstamp_Medida[Serial] then
          begin
            Atraso_TCA[Serial]:=((Tickstamp_AC[Serial]
            -Tickstamp_Medida[Serial]-1)*0.004)-0.006;
          end;

        if Tickstamp_AC[Serial] < Tickstamp_Medida[Serial] then
          begin
            Atraso_TCA[Serial]:=(((250+Tickstamp_AC[Serial])
            -Tickstamp_Medida[Serial]-1)*0.004)-0.006;
```

```

end;

//Medicao do atraso e analise temporal do atraso em relacao a medida
Atraso_TCA_Atual := Atraso_TCA[Serial];
Atraso_TCA_Int[Serial] := round(Int(Atraso_TCA_Atual/Tamost));
Atraso_TCA_Frac[Serial] := (Frac(Atraso_TCA_Atual/Tamost))*Tamost;
Instante_Sinal_Control[serial] := (serial*Tamost)+Atraso_TCA_Atual;

if Instante_Sinal_Control[serial] > 32 then
begin
    Instante_Sinal_Control[serial] :=
        Instante_Sinal_Control[serial]-32;
end;

Janela_ACK[Serial]:=Trunc(Instante_Sinal_Control[serial]/Tamost)+1;

// Calculo do tempo de atraso TCA médio
Atraso_TCA_Medio := (0.9*Atraso_TCA_Medio)+(0.1*Atraso_TCA_Atual);
Atraso_TCA_Medio_Int := round(Int(Atraso_TCA_Medio/Tamost));
Atraso_TCA_Medio_Frac := (Frac(Atraso_TCA_Medio/Tamost))*Tamost;
end;
.
.
.
end;

```

B.7 Módulo de Análise de Perda de Sinal de Controle

```

procedure TForm1.TrataFrame(Vbytes: TByteArr; AThread: TIdPeerThread);
//Chegou Mensagem na Estacao Remota
var
    k: byte;
    m, n, na: integer;
    Amostra_Vazia : boolean;
    CalcInterm1, CalcInterm2, CalcInterm3, CalcInterm4, Valor_Anterior,
    Instante_Anterior: extended;
    msgRecebidaStrg: string;

```

```

Remetente, Serial, ReqIDTipo, CanalMSB, LSBMedida, Tickstamp : Byte;
StrIDFuncao, StrTamanho, StrRemetente, StrSerial, StrReqIDTipo,
StrCanalMSB, StrLSBMedida, StrTickstamp, StrMedida, StrTickRecebe,
StrTickMedida : String;

```

```

begin
  try
    .
    .
    .
    if (Remetente = 11) and (ControladorAuto = 1) then
      //Mensagem identificada como CHEGOU_ACK
      begin

        //Identifica perda de pacote para o sinal de controle

        if (primeira_AC=false) and (Chegou_ACK[lo(Serial-1)]=false) then
          begin
            Saida_Perdeu_AC[Serial+Tempomorto+Atraso_TCA_Medio_Int]:=true;
          end
          else Saida_Perdeu_AC[Serial+Tempomorto+Atraso_TCA_Medio_Int]
            :=false;

        //Tratamento da Perda de Pacote no envio da AC:

        if (Saida_Perdeu_AC[SerialMedida]=true) then
          begin
            Saida_Interna_Testes:=((1-(Atraso_TCA_Medio_Frac/Tau))
            *Vetor_Medida[lo(SerialMedida-1)]+((1/Tau)
            *Atraso_TCA_Medio_Frac*Ganho*Sinal_Control[lo(SerialMedida-2
            -tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]);

            Saida_Estimada_Testes:=((1-((1/Tau)*(Tamost-
            Atraso_TCA_Medio_Frac)))*Saida_Interna_Testes)+((1/Tau)
            *(Tamost-Atraso_TCA_Medio_Frac)*Ganho*Sinal_Control
            [lo(SerialMedida-1-tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]);

```

```

if abs(Saida_Estimada_Testes-Vetor_Medida[SerialMedida])<0.83 then
//equivale a 2 unidades de precisão
begin
//erro menor --> AC foi efetivada
//Manter o valor de AC calculado e calcular o ntca da AC
//Sinal_Control[lo(SerialMedida-1-Tempomorto-Atraso_TCA
_Medio_Int)]:= Sinal_Control[lo(SerialMedida-2-
Tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)];

Instante_Sinal_Control[lo(SerialMedida-1-Tempomorto-
Atraso_TCA_Medio_Int)] := Instante_Medida[lo(SerialMedida-1)]
+((1/2*((Ganho*Sinal_Control[lo(SerialMedida-2
-tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]))-Vetor_Medida
[lo(SerialMedida-1)]))*((Ganho*Tau*Sinal_Control
[lo(SerialMedida-1-tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]))
+(Ganho*Tau*Sinal_Control[lo(SerialMedida-2
-tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)])-(2*Tau*Vetor_Medida
[lo(SerialMedida-1)])-(Tau*sqrt((Power(Ganho,2)
*Power(Sinal_Control[lo(SerialMedida-1-tempomorto
-Atraso_TCA_Medio_Int)],2))+(2*Power(Ganho,2)
*Sinal_Control[lo(SerialMedida-1-tempomorto-
Atraso_TCA_Medio_Int)]*Sinal_Control[lo(SerialMedida-2
-tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)])+(Power(Ganho,2)
*Power(Sinal_Control[lo(SerialMedida-2-tempomorto-
Atraso_TCA_Medio_Int)],2))-(4*Ganho*Sinal_Control
[lo(SerialMedida-1-tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]
*Vetor_Medida[lo(SerialMedida-1)])-(4*Ganho
*Sinal_Control[lo(SerialMedida-2-tempomorto-
Atraso_TCA_Medio_Int)]*Vetor_Medida[lo(SerialMedida)]))
+(4*Vetor_Medida[lo(SerialMedida)]*Vetor_Medida
[lo(SerialMedida-1)])))));

if (Instante_Sinal_Control[lo(SerialMedida-1-
Tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]>Tamost) or
(Instante_Sinal_Control[lo(SerialMedida-1
-Tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]<0)then
begin
Instante_Sinal_Control[lo(SerialMedida-1

```

```
        -Tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)] :=  
        Instante_Sinal_Controlo[lo(SerialMedida-2  
        -Tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]+Tamost;  
    end;  
    Chegou_ACK[lo(SerialMedida-1-Tempomorto-Atraso_  
    TCA_Medio_Int)] := true;  
    Janela_ACK[lo(SerialMedida-1-Tempomorto-Atraso_  
    _TCA_Medio_Int)] := Trunc(Instante_Sinal_Controlo  
    [lo(SerialMedida-1-Tempomorto-Atraso_TCA_Medio_Int)]  
    /Tamost)+1;  
end;  
end;
```