

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**SÉRGIO RICARDO SUESS**

**REDES IP EM APLICAÇÕES DE CONTROLE EM MALHA  
FECHADA:  
PROPOSTA DE ESTRATEGIAS PARA LIDAR COM O  
INDETERMINISMO TEMPORAL**

Porto Alegre

2008



**SÉRGIO RICARDO SUESS**

**REDES IP EM APLICAÇÕES DE CONTROLE EM MALHA  
FECHADA:  
PROPOSTA DE ESTRATEGIAS PARA LIDAR COM O  
INDETERMINISMO TEMPORAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Walter Fetter Lages

Porto Alegre

2008

SÉRGIO RICARDO SUESS

**REDES IP EM APLICAÇÕES DE CONTROLE EM MALHA  
FECHADA:  
PROPOSTA DE ESTRATEGIAS PARA LIDAR COM O  
INDETERMINISMO TEMPORAL**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Co-orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Walter Fetter Lages, UFRGS

Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alessandro Goedtel, UTFPR/CP

Doutor pela Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

Prof. Dr. João César Netto, UFRGS

Doutor pela Universidade Católica de Louvain – Louvain, Bélgica

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr., UFRGS

Doutor pela Université Paul Sabatier de Toulouse – Toulouse, França

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, novembro de 2008.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, meus irmãos e minha esposa. Aos primeiros devo a minha vida e todo o investimento e incentivos necessários que precisei em minha carreira. A minha esposa pelo companheirismo durante o decorrer deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores professores Dr. Carlos Eduardo Pereira e Dr. Walter Fetter Lages, pelo interesse, acompanhamento e auxílio no percurso deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE, pela disposição em dar seu auxílio sempre que a eles recorri.

Aos amigos Dr. César Missio Marcon e Dr. Eduardo Sörensen Ghisolfi pelo estímulo e disposição em auxiliar.

Aos meus colegas do setor de engenharia da empresa Digistar Telecomunicações, que se dispuseram a colaborar com seus conhecimentos. Também a gerência e a diretoria, que flexibilizaram o cumprimento do meu expediente na empresa, viabilizando a frequência no curso de mestrado.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de solução para compensar o atraso variável, característico de redes IP. O preditor de Smith é tradicionalmente usado para compensar atrasos, mas no caso deste tipo de rede um fator importante que pode degradar o controle do sistema são as grandes variações nos atrasos sofridos pelas mensagens. Para tratar este problema, este trabalho baseia-se na criação de uma estrutura de dados de armazenamento para a saída do preditor de Smith, possibilitando a comparação do valor de saída da planta com o valor adequado guardado na estrutura. Para determinação do valor correspondente, este está associado a um índice calculado com o tempo de *roundtrip* obtido de informações dos pacotes de dados proveniente da planta. Para se chegar a tal solução, foi analisada nas primeiras seções a influência do atraso em malhas de controle e posteriormente um estudo do estado da arte para tipos de controle sobre redes IP. Ao final é apresentada uma análise experimental, demonstrando resultados promissores da aplicação desta proposta.

**Palavras-chaves:** Engenharia elétrica, automação e controle, redes IP, preditor de Smith, atraso de transporte.

## ABSTRACT

This work presents a solution to compensate the varying delay, characteristic of IP networks. The Smith predictor is traditionally used to compensate delays but in this type of networks an other important factor that can destabilize the system is the large *jitter* of the delay. In order to solve this problem, the solution presented here is based on a data structure to save the output from the model of the plant used by the Smith predictor, that make possible to compare the output from the plant with the corresponding value in the structure. In order to take the correspondent value, it is associated to an index which is calculated with the roundtrip obtained from the informations in the packet arrived from the plant. In order to formulate this solution, it was analised in the first sections the influence of the delay in control systems and then a study of the state of art of the control systems over IP networks. At the end, an experimental analise to demonstrate the good result of the application of this solution is presented.

**Keywords:** networked control systems, IP networks, Smith Predictor, Transport Delay.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 14 |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | 20 |
| <b>2.1 Análise do Sistema de Controle</b> .....   | 20 |
| 2.1.1 Efeitos do Atraso em uma Malha de Controle.....   | 20 |
| 2.1.2 A escolha do período para sistemas amostrados.....  | 23 |
| 2.1.3 O Preditor de Smith.....  | 25 |
| <b>2.2 Estudo de Redes IP</b> .....   | 32 |
| 2.2.1 Características do Atraso em Redes IP .....   | 32 |
| 2.2.2 Qualidade de Serviço Sobre Redes .....  | 34 |
| <b>3 ALGUMAS ABORDAGENS NO ESTADO DA ARTE</b> .....   | 36 |
| <b>3.1 Distinção de Tipos de Tráfegos em Filas Diferenciadas em Redes Ethernet com Switches</b> ..... | 36 |
| <b>3.2 Arquitetura de Transmissão Ponto a Ponto para Controle Remoto de Robôs via Redes IP</b> .....  | 38 |
| <b>3.3 Supervisão de Sistemas Dinâmicos em Redes Sob Restrições de Coordenação</b> .....              | 46 |
| <b>3.4 Preditor de Smith e o Atraso Variante em Redes IP</b> .....                                    | 48 |
| <b>3.5 Controle em Tempo Real de Robôs Através de Redes IP</b> .....                                  | 51 |
| <b>4 PROPOSTA DE ESTRATÉGIAS PARA LIDAR COM INDETERMINISMO TEMPORAL</b> .....                         | 55 |
| <b>4.1 Hardware Utilizado</b> .....   | 60 |
| <b>4.2 Arquitetura do Experimento</b> .....   | 61 |
| 4.2.1 Roteador.....   | 62 |
| 4.2.2 Planta (Motor).....   | 63 |
| 4.2.3 Controlador.....  | 68 |
| 4.2.4 Análise Comparativa Entre as Duas Soluções Testadas com Compensação de Atraso Variante.....     | 89 |
| <b>5 CONCLUSÃO</b> .....  | 91 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 94 |

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: O Diagrama de blocos de uma Networked Control System – (LIAN, 2001).....                                       | 14 |
| Figura 2: Ilustração de sistema telefônico misto, contendo redes de chaveamento públicas e a Internet (LIMA, 2007).....  | 16 |
| Figura 3: Exemplo de um sistema de controle em malha fechada com atrasos (TIPSUWAN & CHOW, 2003).....                    | 21 |
| Figura 4: Degradação do desempenho de um sistema de controle sob influência de atrasos (TIPSUWAN & CHOW, 2003).....      | 22 |
| Figura 5: Diminuição da margem de ganho em função do aumento do atraso na malha de controle (TIPSUWAN & CHOW, 2003)..... | 23 |
| Figura 6: Sistema amostrado em malha fechada.....  | 24 |
| Figura 7: Saídas do sistema variando o período a partir de $T_{padrão}$ . Obtidas por (ZERBETTO NETO, 2006).....         | 24 |
| Figura 8: Sistema controlado com malha fechada.....  | 26 |
| Figura 9: Sistema de malha fechada realimentado por um ponto B fictício.....   | 26 |
| Figura 10: Malha de controle com o preditor de Smith.....  | 27 |
| Figura 11: Malha de controle com o preditor de Smith evidenciado.....  | 28 |
| Figura 12: Preditor de Smith com influência de imperfeições do modelo (BAHILL, 1983)...                                  | 29 |
| Figura 13: Um controle adaptativo sobre um preditor de Smith (MARSHALL, 1974).....                                       | 32 |
| Figura 14: Um fluxo UDP e um TCP compartilham um link com banda limitada em 300 kbps (LIU et al, 2005).....              | 39 |
| Figura 15: A dinâmica do protocolo trinomial para o caso de dois usuários (LIU et al, 2005).....                         | 42 |
| Figura 16: Resposta do fluxo TCP ao decréscimo de banda (LIU et al, 2005).....   | 43 |
| Figura 17: Resposta do fluxo trinomial ao decréscimo de banda (LIU et al, 2005).....                                     | 43 |
| Figura 18: Arquitetura do sistema de software (LIU et al, 2005).....   | 44 |
| Figura 19: Comparação de atraso e jitter (LIU et al, 2005).....  | 45 |
| Figura 20: Comparação experimental entre as taxas de transmissão (LIU et al, 2005).....                                  | 45 |
| Figura 21: Estrutura do sistema com lógica CG no instante $t$ (CASAVOLA; PAPINI; FRANZÊ, 2006).....                      | 47 |
| Figura 22: Princípio do Network Delay Regulator (NDR).....   | 49 |
| Figura 23: Preditor de Smith com regulador de atraso (WANG; XU; WANG, 2005).....   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24: Teleoperação baseada em preditor de Smith, com e sem adaptação de atraso (WANG; XU; WANG, 2005).....                                      | 51 |
| Figura 25: Ensaio do controle local de 2 juntas de um robô realizado em (ALT, 2003).....   | 53 |
| Figura 26: Ensaio do controle sem compensação de atrasos via rede IP de 2 juntas de um robô realizado em (ALT, 2003).....                            | 53 |
| Figura 27: Ensaio do controle com compensação de atrasos via rede IP de 2 juntas de um robô realizado em (ALT, 2003).....                            | 54 |
| Figura 28: Malha de controle parcial com seus respectivos atrasos.....   | 56 |
| Figura 29: Solução proposta com Preditor de Smith e atraso ajustável.....  | 57 |
| Figura 30: Quadro de dados enviado do controlador para a planta.....   | 57 |
| Figura 31: Quadro de dados enviado da planta para o controlador.....   | 58 |
| Figura 32: Estrutura de dados para o ajuste de atraso de roundtrip.....  | 59 |
| Figura 33: Configuração da bancada de ensaios.....   | 61 |
| Figura 34: Relação entre os módulos de software do experimento.....  | 61 |
| Figura 35: Posição do simulador de rede (roteador) no experimento.....   | 62 |
| Figura 36: Significado das formas usadas em SDL.....   | 66 |
| Figura 37: Estrutura do simulador da planta em SDL.....  | 67 |
| Figura 38: Sistema em malha fechada.....   | 68 |
| Figura 39: Caminho dos pólos em laço fechado no plano complexo, variando-se K no intervalo $(0, \infty)$ .....                                       | 70 |
| Figura 40: Sistema em malha fechada com atraso $\tau$ nos dois sentidos da malha de controle..   | 71 |
| Figura 41: O root locus de $T(s)$ quando os atrasos forem de 10 ms.....  | 72 |
| Figura 42: O root locus de $T(s)$ quando o atraso for de 50 ms.....  | 72 |
| Figura 43: Curva de erro e resposta do sistema sem inserção de atrasos, simulando-se com o Scilab.....   | 73 |
| Figura 44: Resposta ao degrau do sistema considerando diferentes valores para o atraso.....  | 73 |
| Figura 45: Algoritmo do controlador sem compensação para o atraso na rede.....   | 75 |
| Figura 46: Resultado do controle sem compensação de atrasos.....   | 76 |
| Figura 47: Destaque da curva do roundtrip (s) em relação ao tempo (ms).....  | 76 |
| Figura 48: Estrutura simplificada em SDL do algoritmo de controle baseado na solução apresentada em (ALT, 2003).....                                 | 77 |
| Figura 49: Controle com princípios de compensação de atrasos similar ao utilizado em (ALT, 2003), para roundtrip variando entre 125 ms e 222 ms..... | 78 |
| Figura 50: Destaque da curva de roundtrip (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.....  | 79 |
| Figura 51: Controle com princípios de compensação de atrasos similar ao utilizado em (ALT, 2003), para roundtrip crescente e com jitter.....         | 80 |
| Figura 52: Destaque da curva de roundtrip (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.....  | 80 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 53: Algoritmo simplificado de controle em SDL usando-se o Preditor de Smith com ajuste de atraso.....                 | 82 |
| Figura 54: Controle com Preditor de Smith e ajustes de atrasos para roundtrip variando entre 149 ms e 206 ms.....            | 84 |
| Figura 55: Destaque da curva de roundtrip (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.....  | 84 |
| Figura 56: Controle com Preditor de Smith e ajustes de atrasos para roundtrip crescente (170 ms a 1040 ms) e com jitter..... | 85 |
| Figura 57: Destaque da curva de roundtrip (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.....  | 85 |
| Figura 58: Curva de resposta um desajuste no driver de corrente do motor em regime permanente.....                           | 86 |
| Figura 59: Destaque da figura anterior a partir do desajuste do driver de corrente do motor..                                | 87 |
| Figura 60: Curva de resposta a perturbação momentânea em regime permanente.....  | 88 |
| Figura 61: Destaque do momento da perturbação da figura anterior.....  | 88 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Desempenho do sistema de controle local e via rede com compensações dos atrasos robô/controlador e controlador/robô (ALT, 2003)..... | 54 |
| Tabela 2: Especificações do motor de corrente contínua a ser controlado.....   | 63 |
| Tabela 3: Valores de B dados a e $T_a$ .....   | 69 |
| Tabela 4: Lugar das raízes em função do ganho K.....   | 70 |
| Tabela 5: Resultados segundo critérios ISE, IAE, ITSE e ITAE.....  | 90 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATM: *Asynchronous Transfer Mode*

FDM: *Frequency Division Multiplexing*

IAE: *Integral Absolute-Error*

ICMP: *Internet Control Message Protocol*

IP: *Internet Protocol*

ISE: *Integral Square-Error*

ITAE: *Integral-of-Time-Multiplied Absolute-Error*

ITSE: *Integral of Time-Multiplied Square-Error*

MCC: Motor de Corrente Contínua

NCS: *Networked Control System*

NDR: *Network Delay Regulator*

PHBs: *Per Hop Behaviors*

PID: Proporcional - Integral - Derivativo

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PSTN: *Public Switched Telephone Network*

RFC: *Request For Comments*

RTAI: *Real Time Application Interface*

SDL: *Specification and Description Language*

TCP: *Transmission Control Protocol*

TDM: *Time Division Multiplexing*

UDP: *User Datagram Protocol*

WRR: *Weighted Round-Robin*

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem seu escopo na aplicação de malhas de controle fechadas sobre redes, em inglês *Networked Control System* (NCS), que utilizam o *Internet Protocol* (IP) (POSTEL, 1981), motivado pelas vantagens da tecnologia de sistemas distribuídos e pelo potencial de integração de fluxo de dados de natureza distinta sobre a mesma rede. Dentre as vantagens de um sistema distribuído que podem ser citadas, estão o compartilhamento de recursos, a execução concorrente e a tolerância a falhas. No entanto, entende-se por NCS um sistema de controle realimentado no qual os laços de controle fecham através de uma rede de tempo real (WITHEEPHANICH & TIPSUWANPORN, 2006), enquanto que redes IP não foram originalmente implementadas para serem determinísticas.

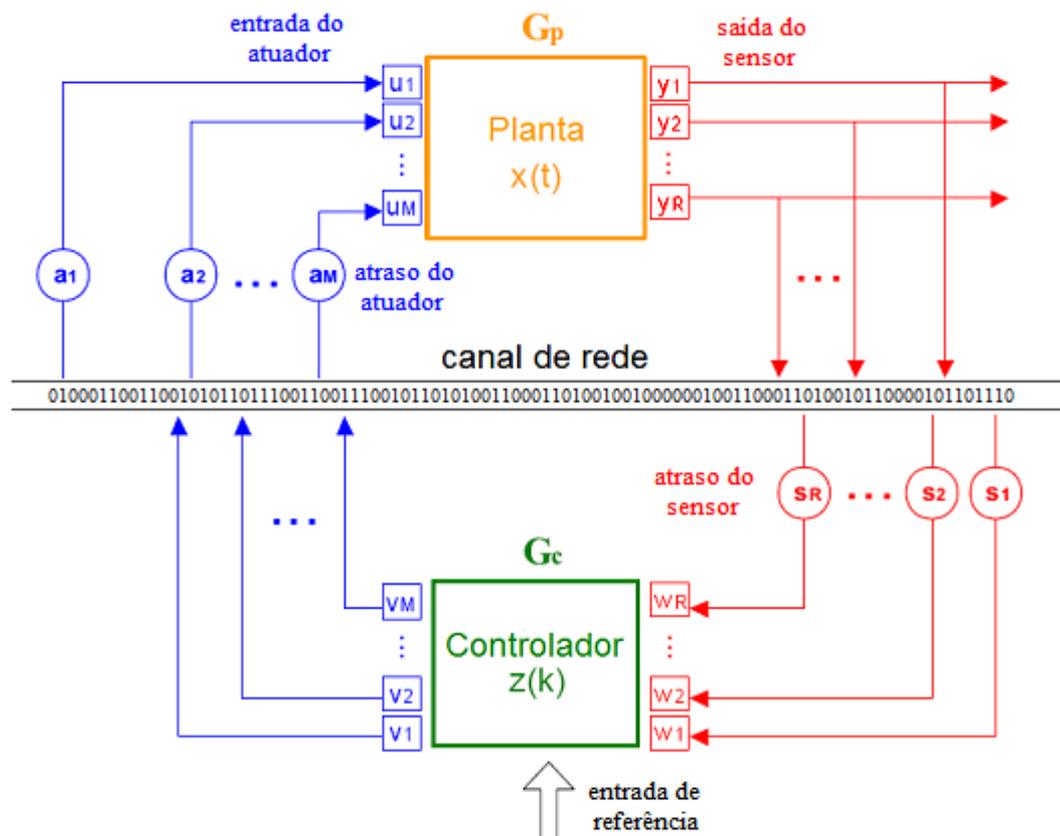
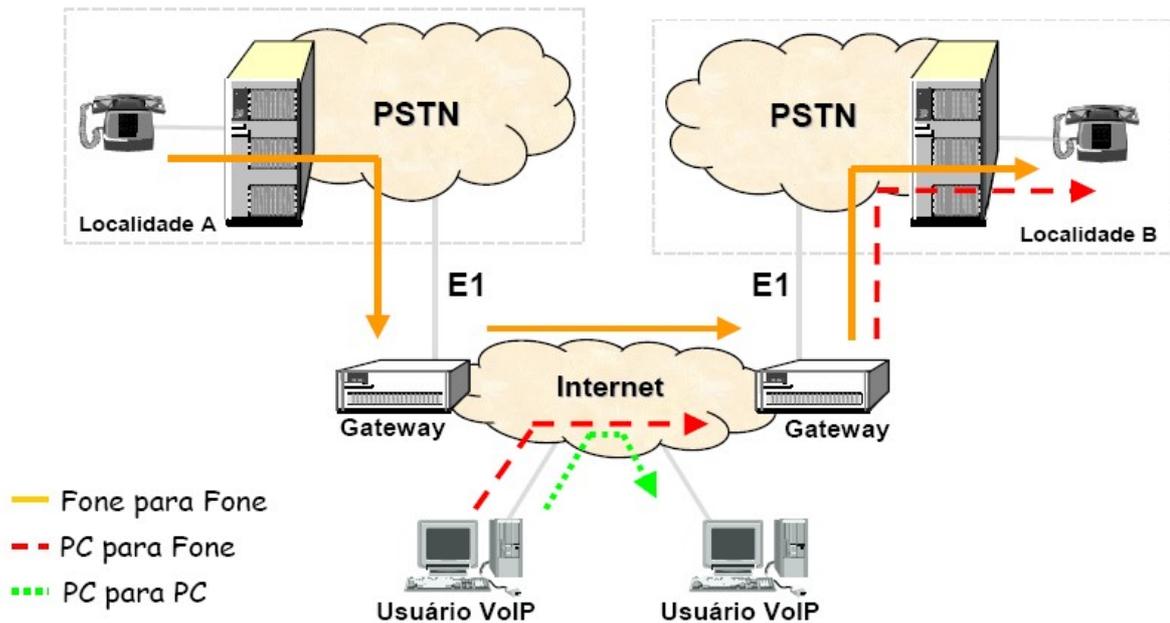


Figura 1: O Diagrama de blocos de uma *Networked Control System* – (LIAN, 2001).

A Figura 1 de (LIAN, 2001), representa um barramento (canal de rede) compartilhado para a comunicação de diversos dispositivos com os seus controladores.

Existe hoje uma grande tendência do uso dos mesmos recursos físicos de comunicação, independente do tipo de informação a ser transmitida. Alguns objetivos claros a se seguirem nesta direção são a otimização do uso da infraestrutura na qual se faz o investimento, a simplificação no ambiente da instalação (menos cabos) e a integração entre todos os dados em um mesmo sistema. Um exemplo que evidencia esta tendência é a migração da transmissão de voz com o uso de redes de telefonia pública, em inglês, *Public Switched Telephone Network* (PSTN) para o uso de redes que usam a Internet como infraestrutura de comunicação. Esta última, que foi inicialmente idealizada para transportar dados, tinha um tráfego menor que a rede de voz, mas esta realidade mudou e agora já se transmite voz codificada juntamente com os pacotes de dados no protocolo da Internet. Hoje, se tem um estado intermediário onde as duas redes existem e estão conectadas, conforme ilustra a Figura 2.

Os pacotes de voz da rede telefônica que trafegam, seja sobre redes PSTN ou IP, devem ser entregues ao destino respeitando os requisitos de tempo para garantir a qualidade da conversação estabelecida, i.e., requisitos de tempo real. Além de chegar com um atraso que não deve ser maior que 150 ms, segundo a recomendação G.114 (ITU-T, 2003), o *jitter* do atraso deve ser anulado na chegada. O *jitter* pode ser eliminado utilizando um *buffer*, que armazena os pacotes chegados antecipadamente, segundo algum critério adotado para o atraso estimado, para utilizá-los no momento certo.



**Figura 2: Ilustração de sistema telefônico misto, contendo redes de chaveamento públicas e a Internet (LIMA, 2007).**

Devido ao advento de aplicações como a de telecomunicações citada acima, muitos estudos e desenvolvimentos já foram feitos para contornar as características do indeterminismo quanto aos tempos de tráfego de pacotes na rede IP. Dentre estes, são aplicadas diversas políticas de prioridade de filas em roteadores que conectam as redes. Também foram criados protocolos de forma que os nodos que estão se comunicando possam trocar informações do estado do tráfego entre si por meio de pacotes modificados. Estes avanços até então aplicados para voz e multimídia, também podem ser aplicados na área de controle e automação. Algumas aplicações tais como controle de temperatura de tanques, controle de velocidade ou posição de motores, teleoperação de robôs, entre outras, são realidade em diversos setores industriais. Em (ZEILMANN, 2002), foi desenvolvido um experimento com o objetivo de criar uma ferramenta didática, onde um cliente remoto via applet java pudesse alterar parâmetros de controle proporcional - integral - derivativo (PID). Isto é, remotamente passam-se os parâmetros do controlador e referências a serem seguidas, mas o controle ocorre localmente.

Segundo (MONTUFAR-CHAVEZNAVA & MENDEZ-POLANCO, 2005), teleoperação de robôs, ou telerobótica, está relacionada à autonomia. Trata-se de uma tecnologia interessante quando há riscos quanto à segurança humana, restrições de tempo ou restrições devido ao custo. Em 1994 surgiram os primeiros robôs teleoperados via rede IP, localizados na Califórnia em Berkeley e na Universidade do Oeste da Austrália. Estes poderiam ser acessados por qualquer usuário via *WEB browser*. A partir deste momento, foram desenvolvidos muitos robôs teleoperados via Internet. No Brasil, (LAGES, 1998) apresentou um robô, então denominado Twil, com o qual as pessoas poderiam obter leituras de seus sensores on-line ou movimentá-lo. No entanto, normalmente estes robôs operam em ambientes bem conhecidos, sem ou com poucas situações imprevistas. Em ambientes mais hostis, há necessidade de ferramentas mais sofisticadas de monitoramento e controle para situações não previstas (MONTUFAR-CHAVEZNAVA & MENDEZ-POLANCO, 2005).

Alguns fatos devem ser considerados quando se trata de teleoperação, devido à distância. Algumas distorções podem ocorrer no controle e na estabilidade. Em geral, apenas o objetivo (trajetória) é informado ao robô, mas neste trabalho será avaliado o laço de controle em malha fechada, cujo cálculo da lei de controle é feito remotamente em relação à planta. Neste caso, a estabilidade e o desempenho são determinados por uma interação complexa entre latência e ganho em torno do laço de controle.

Dentre os motivos do estudo de laços de controle sobre redes IP encontra-se a disponibilidade do meio físico amplamente difundido. Em função disso, o seu custo também se tornou mais acessível. As redes IP foram idealizadas para serem compartilhadas para a transmissão de dados de diversas aplicações executadas ao mesmo tempo, o que otimiza o uso da instalação.

Embora o IP não tenha sido desenvolvido primeiramente para criar uma rede determinística, foram realizados estudos que comprovam a possibilidade de tornar uma rede

IP capaz de atender a limites de tempos de transmissão desejados, como em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004) e também em (MAHRAMIAN, 2007). O tempo de propagação do sinal transmitido no meio físico entre dois dispositivos na rede pode ser estimado por tabelas da recomendação G.114 (ITU-T, 2003), mas a contribuição deste atraso é menos importante que o tempo que os pacotes ficam em filas de roteadores do caminho percorrido. Portanto, uma política de prioridade deve ser aplicada de tal forma que pacotes que necessitam tratamento diferenciado para chegar ao destino em determinado tempo assim o façam. Para isso, é necessária a separação de pacotes em grupos (ou filas), de acordo com suas prioridades. Esse tipo de estudo foi realizado em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004) e demonstra que o atraso pode ser previsto em uma rede ethernet que tenha apenas *switches* para conectar seus pontos de origem e destino. Em (WANG; XU; WANG, 2005), equacionou-se o atraso de uma rede e considerou-se que existe uma probabilidade de comportamento no atraso, baseando-se em sua característica *self-similar*, i.e., o intervalo seguinte ao atual apresenta uma grande probabilidade de manter a mesma taxa de fluxo. Este estudo será abordado com mais detalhes na Seção 3.4.

Se o atraso máximo pode ser previsto, então, para projetar o controle de algum dispositivo bastaria assumir que o atraso sempre seria o máximo, analisar se este estaria dentro dos limites para alcançar o desempenho desejado com estabilidade e aplicar uma solução do tipo *buffers* de compensação de *jitter* de atraso. Porém, este trabalho avalia a possibilidade de controle considerando variações no atraso, mas sem trabalhar com o pior caso, para que se consinga atender a exigências de desempenho maiores.

Este trabalho foi organizado na seguinte forma: no Capítulo 2 é feita uma fundamentação teórica onde são abordadas algumas teorias de controle, em especial o preditor de Smith, e características de redes que utilizam o protocolo IP. O Capítulo 3 apresenta o estado da arte para malhas de controle sobre redes IP. Segue no Capítulo 4 a proposta com

ensaios de soluções para o controle de um sistema nas condições apresentadas pela rede em questão. A conclusão é apresentada no Capítulo 5.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta Seção são abordados aspectos que caracterizam malhas de controle, NCS e também características de redes IP. O objetivo é iniciar uma análise do que ocorre quando uma malha de controle tem uma rede IP como meio de transmissão para troca de informações entre o controlador e a planta. O tempo de transmissão de pacotes intrínseco via rede, conhecido como atraso em malhas de controle, torna-se um ponto de estudo fundamental, sendo necessário o detalhamento de seu impacto quando na malha de controle encontra-se uma rede IP.

Então, a análise feita nesta Seção ajuda a entender as implicações do uso de redes IP em malhas de controle fechadas, objetivo deste trabalho, possibilitando definir o que deve ser tratado para se possibilitar este tipo de malha.

### **2.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE CONTROLE**

São abordadas nesta Seção teorias bem conhecidas de controle. Também é explicado o preditor de Smith - uma solução clássica para redes de controle com forte influência de atrasos.

#### **2.1.1 Efeitos do Atraso em uma Malha de Controle**

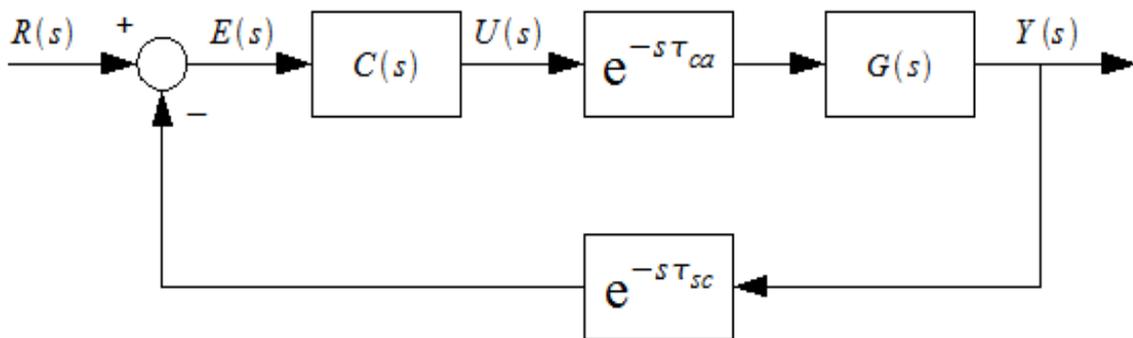
Dependendo do sistema controlado, o atraso na malha de controle fechada pode ter influências distintas. Em alguns casos um determinado valor de atraso pode ser necessário para se conseguir a estabilidade, em outros, qualquer valor de atraso pode levar o sistema na direção da instabilidade. Em (TIPSUWAN & CHOW, 2003) foram analisados os efeitos de diversos valores de atraso para um sistema de segunda ordem. Para isso, este utiliza o modelo de um motor de corrente contínua (MCC) representado por  $G(s)$  (1) e o controlador PI,

representado por  $C(s)$  (2). Sobre a malha da Figura 3, simulou-se a resposta ao degrau unitário. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.

$$G(s) = \frac{2029,826}{(s+26,29)(s+2,296)} \quad (1)$$

$$C(s) = \frac{\beta \cdot K_p \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right)}{s} \quad (2)$$

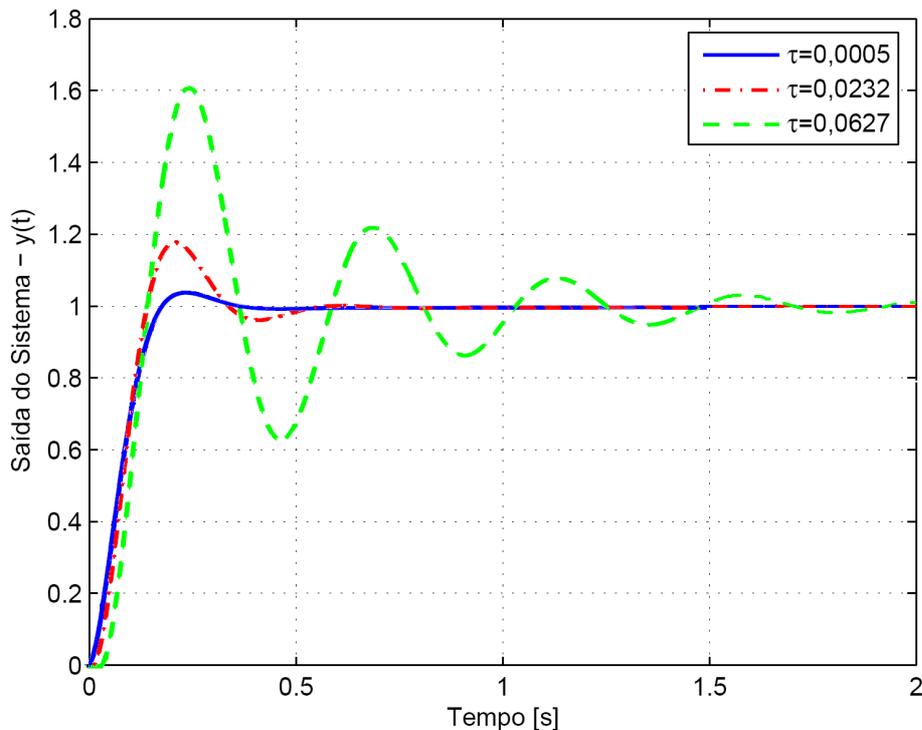
onde  $\beta = 1$ ,  $K_p = 0,1701$  e  $K_i = 0,378$ .



**Figura 3: Exemplo de um sistema de controle em malha fechada com atrasos (TIPSUWAN & CHOW, 2003)**

Esse estudo, constatou a degradação do desempenho do sistema quando foram aumentados os atrasos no sentido do controlador para a planta e da planta para o controlador, respectivamente  $\tau_{ca}$  e  $\tau_{sc}$ , onde  $\tau_{ca} = \tau_{sc} = \tau/2$ . Na Figura 4 é ilustrada a resposta ao degrau do sistema descrito, onde em (TIPSUWAN & CHOW, 2003) foram considerados os seguintes valores de  $\tau$  para 3 ensaios: 0,0005, 0,0232 e 0,0627. Com o aumento dos atrasos foram verificados o aumento do sobressaio e o prolongamento do tempo de acomodação.

Outra análise realizada, foi a relação entre a margem de ganho e o atraso da rede. Verificou-se que quanto maiores os atrasos introduzidos pela rede, menores os ganhos possíveis para manter o sistema estável. As curvas de *root locus* representadas por (TIPSUWAN & CHOW, 2003) na Figura 5 são o resultado também da consideração de diferentes atrasos. Para o traçado das curvas foi fixado um valor de atraso para cada uma delas e então variado o valor de  $\beta$  da função  $C(s)$  (2). Observa-se que os valores de  $\tau$  iguais a 0,1, 0,2 e 0,5 o valor máximo de  $\beta$  para as curvas se manterem no semi-plano direito foram respectivamente 1,16, 0,66 e 0,313. Estes resultados demonstram que para este exemplo, o atraso influencia quanto ao valor máximo de ganho possível dentro dos limites de estabilidade. Para atrasos maiores, os valores de ganho máximo são menores. Este é o caso deste exemplo e serve para demonstrar que deve ser feita uma análise das influências do atraso no sistema a ser controlado, verificando-se se este ainda terá o comportamento desejado para valores de atrasos ao qual será submetido.



**Figura 4: Degradação do desempenho de um sistema de controle sob influência de atrasos (TIPSUWAN & CHOW, 2003).**

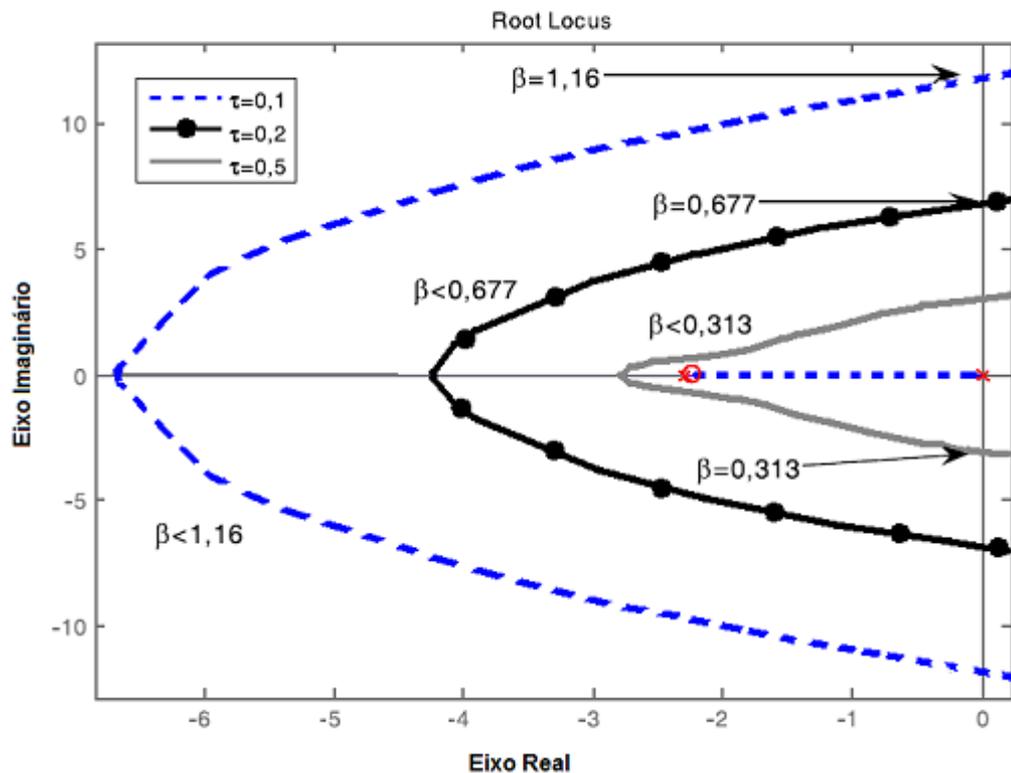


Figura 5: Diminuição da margem de ganho em função do aumento do atraso na malha de controle (TIPSUWAN & CHOW, 2003).

### 2.1.2 A escolha do período para sistemas amostrados

Como será abordado em seções posteriores o controle de sistemas por computador (sistema amostrado), o período de amostragem deve ser tal que não degrade o funcionamento do sistema. Em (ZERBETTO NETO, 2006), a partir do mesmo sistema usado como exemplo na Seção 2.1.1, demonstrou-se graficamente as respostas do sistema amostrado da Figura 6 para diferentes períodos de amostragem. Baseando no critério descrito em (BAZANELLA & GOMES, 2006), foi escolhido  $1/5$  da constante de tempo do sistema como período padrão ( $T_{\text{padrão}}$ ). Tal constante de tempo da expressão (3), para  $G(s)$ , foi obtida fazendo-se o valor inverso do pólo mais próximo à origem.

$$\text{constante de tempo} = \frac{1}{2,296} = 0,4355 \quad (3)$$

A partir do período escolhido, foram geradas outras curvas de resposta para períodos de amostragem maiores. A Figura 7 ilustra a perda de qualidade à medida que o período de amostragem padrão é aumentado 4, 8, 12, 16 e 20 vezes. Juntamente com as curvas de resposta para estes diferentes períodos de amostragem, há uma curva para um sistema contínuo equivalente servindo de comparação.

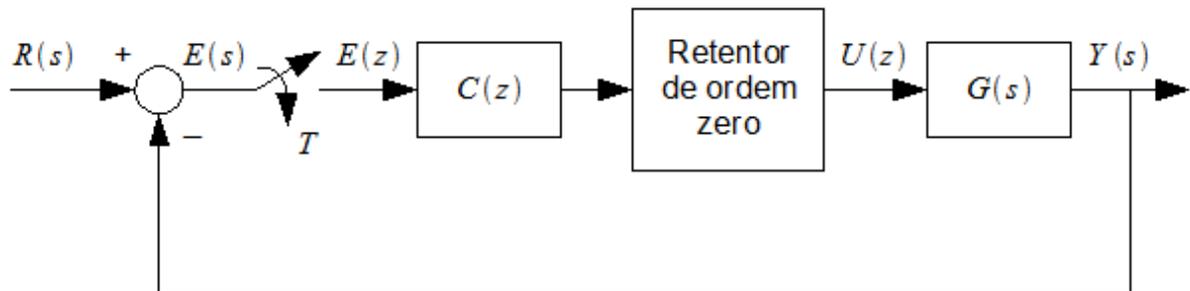


Figura 6: Sistema amostrado em malha fechada.

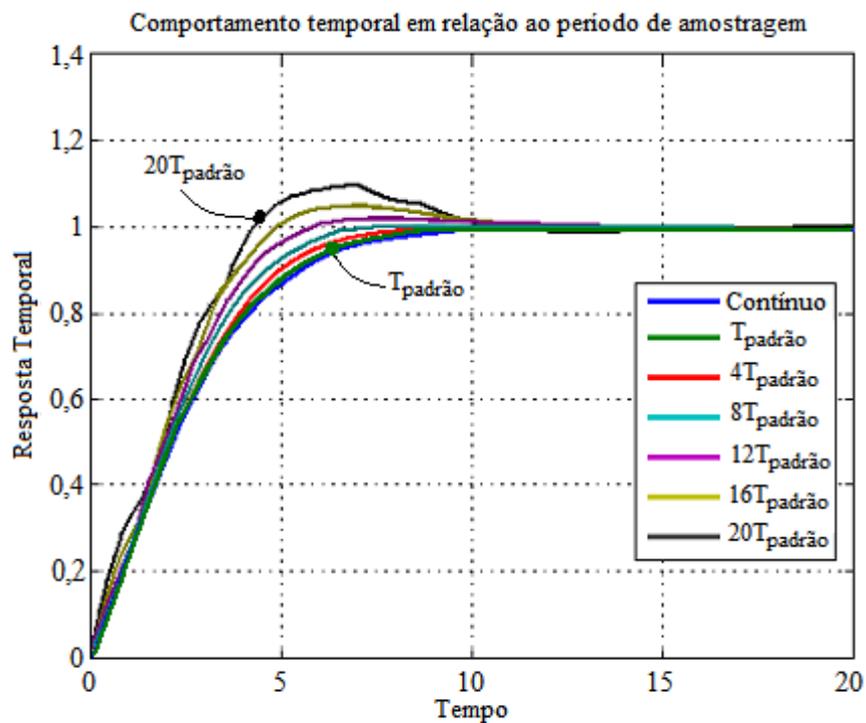


Figura 7: Saídas do sistema variando o período a partir de  $T_{\text{padrão}}$ . Obtidas por (ZERBETTO NETO, 2006).

### 2.1.3 O Preditor de Smith

Como visto nas Figura 5 e Figura 7, ao ser inserido atraso em um sistema, este pode ter o seu comportamento alterado. No caso do exemplo de tais figuras, os limites de ganho superiores do controlador tornaram-se menores a medida que foi aumentado o atraso. No entanto, a diminuição do ganho pode não ser desejada, pois afeta o desempenho do sistema. Uma das formas para lidar com esta questão, é o uso do preditor de Smith (BAHILL, 1983). Este preditor permite a manutenção da resposta do sistema, quando comparado com o controle local, apenas deslocada no tempo.

A Figura 8 representa um sistema em malha fechada, onde o controle está representado por  $C(s)$ , possíveis perturbações por  $L(s)$ , a planta por  $G_p(s)$  e o atraso de transporte por  $T_p(s) = e^{-s\theta_p}$ , onde  $\theta_p$  é o atraso no domínio tempo. A saída do sistema está representada por  $Y_p(s)$  e o sinal de referência por  $R(s)$ . A função de transferência da planta ( $G_p(s)$ ) foi separada do atraso ( $T_p(s)$ ) de forma fictícia, sem afetar o resultado ( $Y_p(s)$ ). Desta forma, surge a saída do bloco  $G_p(s)$  que foi convencionada como  $B(s)$ . Se fosse possível fechar a malha a partir da leitura de  $B(s)$ , no lugar de  $Y_p(s)$ , o laço realimentado de controle não conteria atraso, portanto os problemas analisados até então, relacionados com o atraso, não existiriam. Seria mais fácil definir os parâmetros de controle, como se fosse um controle local, obtendo-se então a representação do sistema visto na Figura 9.

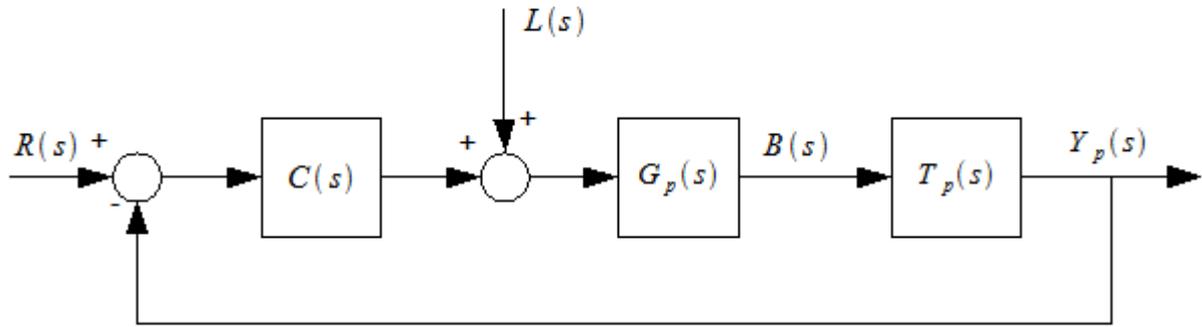


Figura 8: Sistema controlado com malha fechada.

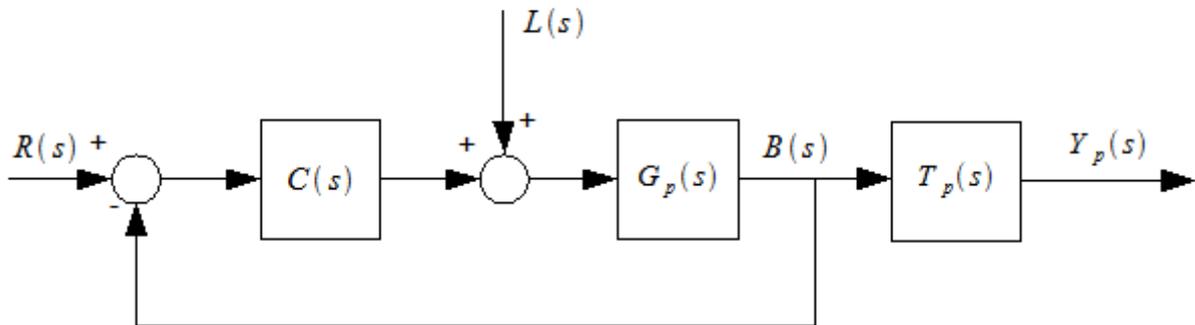
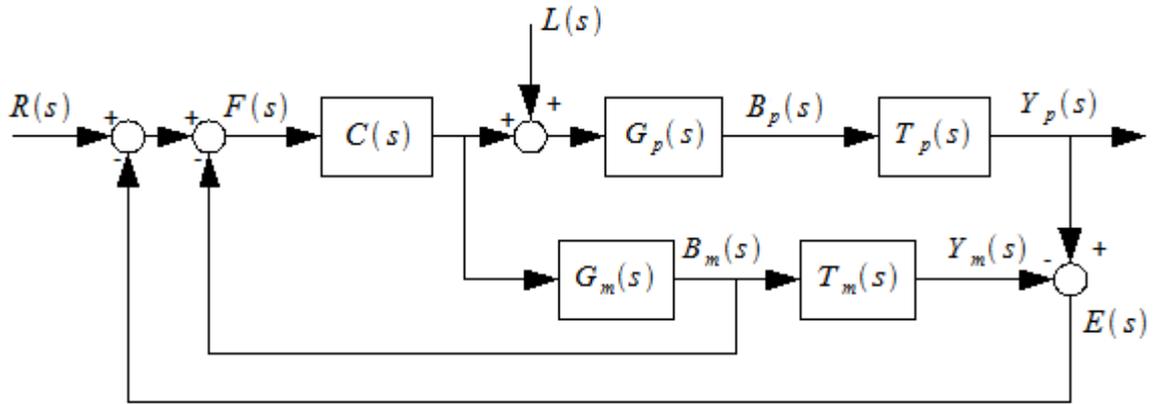


Figura 9: Sistema de malha fechada realimentado por um ponto B fictício.

No entanto, a representação da Figura 9 é irreal, embora com o mesmo resultado matemático. Então, para se chegar a uma solução próxima a esta idéia e obter  $B(s)$ , cria-se um modelo paralelo, tão representativo quanto possível do comportamento da planta. Este modelo pode ser manipulado matematicamente para que sejam blocos separados o atraso e a equação que representa a dinâmica da planta ( $G(s)$ ). A representação das equações da planta é feita por  $G_p(s)$ ,  $B_p(s)$  e  $T_p(s)$ , enquanto que do modelo por  $G_m(s)$ ,  $B_m(s)$  e  $T_m(s)$ . O controle passa a ter então a realimentação de  $B_m(s)$  e o erro  $E(s)$  que representa a diferença entre a saída da planta e a saída do modelo. Este erro  $E(s)$

corrige imprecisões do modelo em relação à planta real e também eventuais perturbações. Esta nova representação se encontra na Figura 10.



**Figura 10: Malha de controle com o preditor de Smith.**

Se  $L(s)$  for considerado nulo, resulta:

$$\frac{Y_p(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_p(s)T_p(s)}{1 + C(s)G_m(s) - C(s)G_m(s)T_m(s) + C(s)G_p(s)T_p(s)} \quad (4)$$

Seguindo-se as equações (5), (6) e (7) o diagrama em blocos da Figura 11 pode ser redesenhado conforme apresentado na Figura 8. O bloco em linha tracejada é chamado preditor de Smith e este é representado por  $G_{sp}(s)$ .

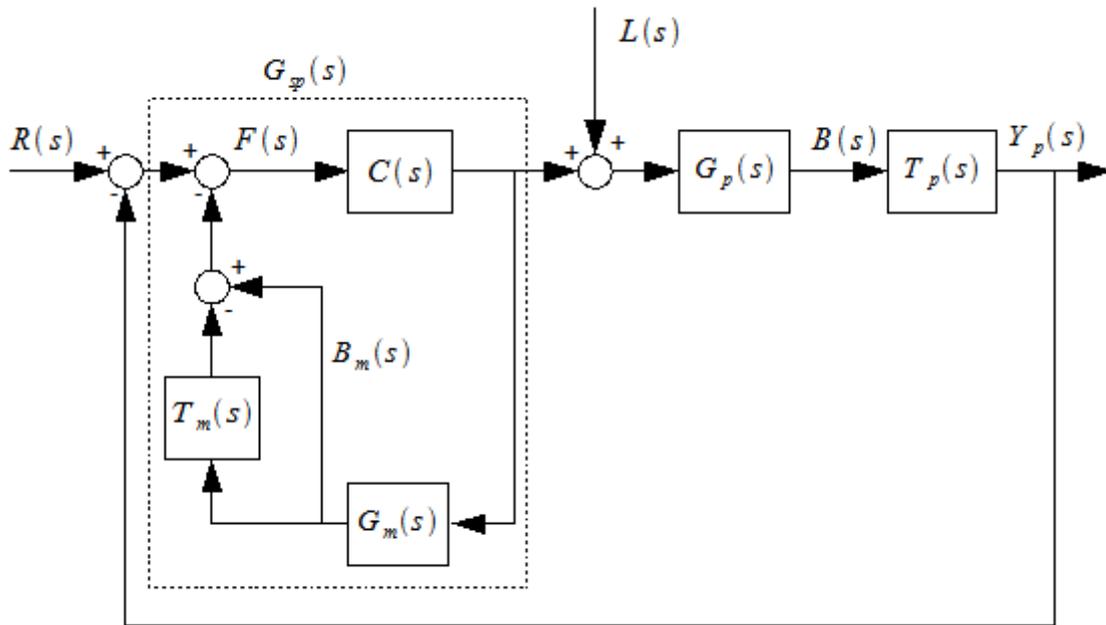
$$F(s) = R(s) - E(s) - B_m(s) \quad (5)$$

$$F(s) = R(s) - (Y_p(s) - Y_m(s)) - B_m(s) \quad (6)$$

$$F(s) = R(s) - Y_p(s) - (-Y_m(s) + B_m(s)) \quad (7)$$

A função de transferência deste módulo é representada pela expressão (8).

$$G_{sp}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_m(s)(1 - T_m(s))} \quad (8)$$



**Figura 11: Malha de controle com o preditor de Smith evidenciado.**

Obtido o modelo  $G_m(s)$  da planta e o respectivo atraso  $T_m(s)$ , o controlador pode ser ajustado sem ser considerado o atraso. Considerando-se as igualdades (9) e (10), em seguida aplicando-as em (4), obtém-se a função de transferência de (11). Esta função é a mesma que seria obtida caso o controle fosse local, porém com um deslocamento no tempo de  $\theta_p$  representado por  $T_p(s)$ .

$$G_m(s) = G_p(s) \quad (9)$$

$$T_m(s) = T_p(s) \quad (10)$$

$$\frac{Y_p(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_p(s)}{1 + C(s)G_p(s)} T_p(s) \quad (11)$$

Seguindo a notação de (MARSHALL, 1974), em (BAHILL, 1983) foi representado o laço de controle pela Figura 12 e pelas expressões (12) e (13) para serem verificadas as influências de desajustes do atraso do modelo de do próprio modelo em relação à planta real.

Primeiro encontram-se as equações que representam o sistema, acrescidas das influências causadas por variações. Estas são representadas por  $\Delta$  junto a grandeza que sofreu variação.

$$G_m(s) = G_p(s) + \Delta G_p(s) = G(s) + \Delta G(s) \quad (12)$$

$$T_m(s) = e^{-s(\theta_p + \Delta\theta_p)} = e^{-s\theta_p} e^{-s\Delta\theta_p} = T_p(s) \Delta T_p(s) = T(s) \Delta T(s) \quad (13)$$

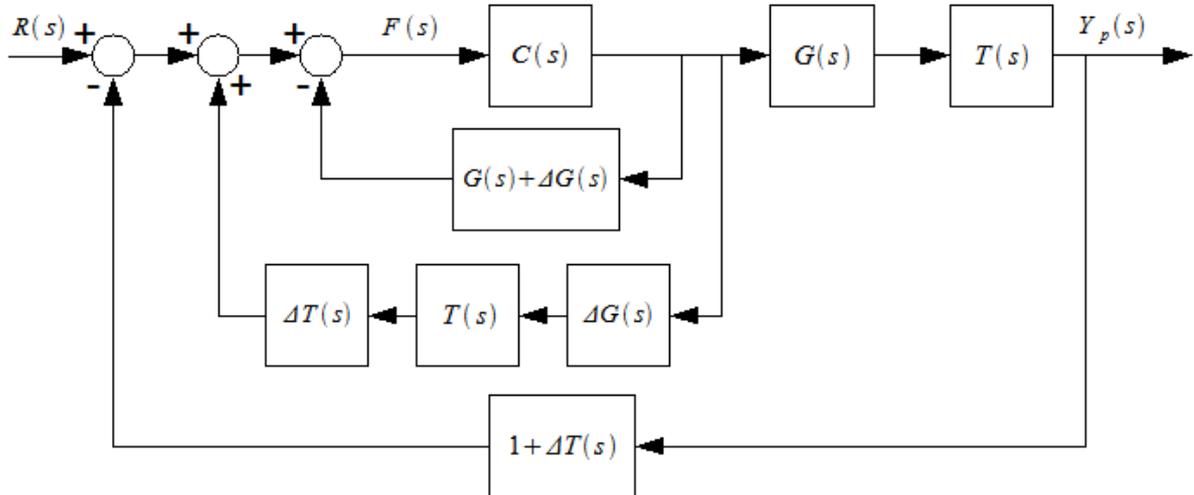


Figura 12: Preditor de Smith com influência de imperfeições do modelo (BAHILL, 1983).

Observa-se na Figura 12 que mesmo considerando que não tenha ocorrido variação de atraso, i.e.  $\Delta T(s) = 1$ , a planta vai sofrer a influência do atraso na realimentação positiva do produto de  $T(s)$  com  $\Delta G(s)$ , podendo mudar as características de estabilidade do sistema. Mas também se observa que caso se desconsidere uma possível variação da planta, neste caso  $\Delta G(s) = 0$ , a realimentação positiva é reduzida a zero, mas resta o laço externo da Figura 12, onde a variação do atraso pode tornar o sistema instável.

Ainda em (BAHILL, 1983), foi ilustrado como o sistema representado pela equação (4), pode se tornar instável com o erro de estimativa do atraso. Foram considerados:

$$G_m(s) = G_p(s) = \frac{1}{s+1} \quad (14)$$

e um controle PD:

$$C(s) = 4(0,5s + 1) \quad (15)$$

Usando-se a aproximação de Padé para  $T_p(s)=e^{-s\theta_p}$  e  $T_m(s)=e^{-s\theta_m}$  considerando-se o atraso da planta  $\theta_p=1s$  e o do modelo  $\theta_m=100ms$ , chega-se a função de transferência do sistema representado por (14), (15) e pela malha da Figura 12:

$$\frac{Y_p(s)}{R(s)} = \frac{2(s^3 + 24s^2 + 84s + 80)Tp(s)}{3s^3 - s^2 + 86s + 200} \quad (16)$$

Observa-se então o coeficiente negativo no denominador, indicando a instabilidade deste sistema por apresentar pólos no semi-plano direito do plano  $s$ . As raízes do denominador são  $-2$  e  $1,1666667 \pm 5,6543985i$ . A aproximação de Padé pode não ser suficiente para garantir que um sistema seja estável, mas neste exemplo foi o suficiente para demonstrar a instabilidade.

Devido ao que foi demonstrado até então, na próxima subseção, será abordado um método de sistema adaptativo para o preditor de Smith, que serve para corrigir o modelo de forma automática.

### 2.1.3.1 Um Sistema com Preditor de Smith Adaptativo

Devido à dificuldade que pode haver na obtenção do modelo de uma planta a ser controlada e também por que este pode variar no tempo, seja em função de desgastes nos componentes desta, variações no ambiente, ou qualquer outro fator pertinente, existe a necessidade de reajustes no modelo. Isso pode ser feito de forma automática por meio de um controle adaptativo. Em (BAHILL, 1983) é demonstrado um controle adaptativo abordado até o final desta subseção.

Para começar, deve ser definido o critério de desempenho e um método de minimização. O critério ISE, cuja função de desempenho  $J$  é diretamente proporcional à integração do erro  $e$  quadrático entre a saída da planta e do modelo, caracteriza-se por dar mais peso para erros maiores. Portanto, sistemas que minimizam este critério tendem a ter uma rápida diminuição do erro inicial. Este critério é representado pela equação (17).

$$J = 0,5 \cdot \int e^2(t) dt \quad (17)$$

A seguir, a relação entre a variação de  $J$  e a variação do atraso real da planta deve ser equacionada. A partir desta relação, com a obtenção da variação do atraso real em função da variação de  $J$ , por simplicidade, os ajustes no atraso do modelo são feitos em intervalos discretos. Bahil (1983) representa o atraso real da planta como  $\theta_p$ , o atraso do modelo por  $\theta_m$  e a saída da planta por  $y_p$ . A variação de  $\theta_m$  é então relacionada ao gradiente de  $y_p$  por  $-k$ , conforme (18). O valor de  $k$  deve ser obtido de acordo com a aplicação.

$$\Delta\theta_m = -k \nabla y_p \quad (18)$$

Seguindo-se as deduções feitas em (BAHIL, 1983), obtém-se (19) e (20).

$$\frac{1}{k} = - \int_{t1}^{t2} \left| \frac{\partial y_p}{\partial \theta_p} \right|^2 dt \quad (19)$$

$$\Delta\theta_m = -k \cdot \int_{t1}^{t2} e \cdot \frac{\partial y_p}{\partial \theta_p} dt \quad (20)$$

Com a obtenção de  $\Delta\theta_m$ , o modelo do preditor de Smith é readaptado à nova realidade da planta. Em (MARSHALL, 1974) foi simulado o sistema da Figura 13, que se mostrou estável e teve uma dinâmica satisfatória quando submetido a um erro de atraso inicial de 80%. O sistema ajustou o atraso para dentro da faixa de 10% de erro em um período equivalente a um atraso e para o valor correto em dois períodos. A derivada  $\partial y_p(t) / \partial \theta_p$  é chamada função de sensibilidade e é obtida por um algoritmo que contém o atraso, por isso, além de receber a entrada  $y_p$ , o bloco da “Estimação de sensibilidade” da Figura 13 é ajustado com o atraso atualizado. Este algoritmo é demonstrado detalhadamente em (BAHILL, 1983).

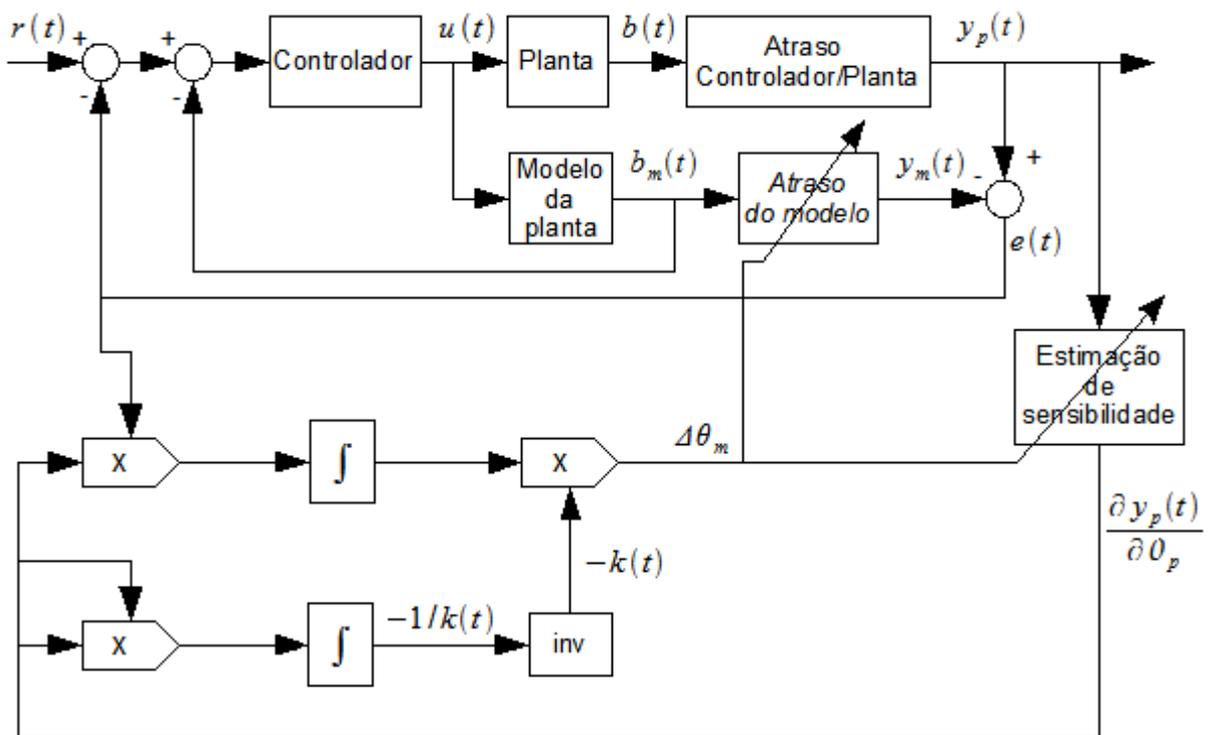


Figura 13: Um controle adaptativo sobre um preditor de Smith (MARSHALL, 1974).

## 2.2 ESTUDO DE REDES IP

Nesta Seção serão abordados tópicos importantes para o entendimento de algumas características de redes IP, permitindo julgar melhor suas potencialidades para o uso em NCS. Alguns recursos são disponibilizados nas redes existentes, porém necessitam configuração. Para se ter garantia de comportamento, o caminho por onde os pacotes serão transmitidos precisa ser conhecido e os pontos de decisão de encaminhamento (roteadores) devem ser configurados.

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS DO ATRASO EM REDES IP

Conforme as secções anteriores, o atraso é um elemento importante na estabilidade de sistemas sob controle digital. O controle deve ser ajustado para o atraso presente na malha, a

fim de compensá-lo. Este ajuste é possível dentro de uma faixa de valores para o atraso que não desestabilizem o sistema. No entanto, quando na malha do sistema existe uma rede IP, é necessário tratar o atraso quanto sua magnitude e variação. Quando se tratar da Internet, a questão é mais complexa, pois em geral, nesta rede, não se sabe qual o limite máximo para o atraso. Na recomendação G.114 (ITU-T, 2003) há uma tabela com tempos estimados para o atraso relacionado aos tipos de meios físicos e as distâncias sobre estes meios. Por exemplo, na tabela da G.114 (ITU-T, 2003) são estimados  $4\mu\text{s}$  de atraso por km de cabo coaxial terrestre, seja transmissão em banda básica ou sinal modulado em frequência - *Frequency Division Multiplexing* (FDM).

O IP transfere dados de qualquer tipo em pacotes, os quais são enviados de sua origem para um destino por caminhos diversos. De acordo com o caminho tomado, pode haver roteadores com filas cheias de pacotes e estes pacotes têm atrasos dependentes da política destas filas nestes roteadores, que é normalmente o fator que mais contribui para o atraso. Além disto, se a rota por onde está indo o pacote estiver congestionada, este pode ser descartado. Desta forma, a complexidade do tratamento que deve ser despendida pelo controlador pode aumentar bastante e a partir daí diversos estudos foram realizados. Alguns destes são descritos na Seção 3, que aborda o estado da arte.

No princípio, a Internet surgiu como um recurso para transferência de pacotes sem requisitos de tempo real, como por exemplo, arquivos de texto, e-mails e banco de dados. Priorizou-se a garantia de entrega dos pacotes sem erros. A forma mais comum de garantir esta entrega é o reenvio dos pacotes quando o transmissor não recebe uma resposta do destino. Mas quem se encarrega desta tarefa, é o protocolo de uma camada acima do IP, normalmente o TCP.

O reenvio de pacotes pode garantir a integridade do conteúdo, no entanto, é mais um fator para aumentar o atraso. Na maioria das vezes, em aplicações de tempo real, em inglês

*Real Time* (RT), é melhor enviar um pacote com dados mais recentes do que uma informação antiga que não chegou ao seu destino.

Em função destes problemas, criou-se o conceito de qualidade de serviço do protocolo, em inglês *Quality of Service* (QoS) (XIAO & NI, 1999). Diferentes aplicações exigem tratamentos também diferenciados, algumas toleram atrasos, outras não toleram atraso excessivo, mas admitem alguma perda de pacote. Neste último caso se enquadram aplicações de sistemas de controle via rede IP. Considerando um sensor de uma determinada planta que envia informações periodicamente para o controlador e a partir destas, o controlador conhece o estado em que se encontra esta planta. Se o pacote contendo estas informações não chegar no tempo previsto, a planta poderá estar em um estado diferente do que segue na informação, sendo melhor a transmissão de dados mais atuais.

### **2.2.2 QUALIDADE DE SERVIÇO SOBRE REDES**

Qualidade de serviço, sob o ponto de vista de um usuário, pode ser interpretada como a ausência de interrupções em um vídeo ou uma conversação sem intervalos ou distorções de áudio. No ramo da telefonia, tradicionalmente as empresas de telecomunicações tem conseguido excelente índices desta qualidade, pois costumavam utilizar apenas canais dedicados entre as partes envolvidas. Desta forma, a capacidade de fluxo de pacotes de voz é constante e garantida. No momento em que começaram a usar redes IP, quebrando a informação em diversos pacotes que trafegam através dos mesmos roteadores que outros tipos de dados também trafegam, sem reserva de um canal exclusivo, tornou-se necessário criar mecanismos de QoS para tratar pacotes de forma diferenciada. Estes mecanismos devem levar em conta os requisitos de tempo real das aplicações envolvidas na transmissão, dando-se menor prioridade aos pacotes sem tais requisitos.

Os problemas a serem tratados são basicamente a capacidade limitada de fluxo, o atraso nas filas dos roteadores e o descarte de pacotes. Desta forma, diversos métodos foram padronizados e são documentados na forma de *Request For Comments* (RFC). Algumas RFCs relacionadas à qualidade de serviço são: RFC 2474 (NICHOLS *et al*, 1998), RFC 3168 (RAMAKRISHNAN; FLOYD; BLACK, 2001) , RFC 3260 (GROSSMAN, 2002) e RFC 1122 (BRADEN, 1989).

### 3 ALGUMAS ABORDAGENS NO ESTADO DA ARTE

Nesta Seção serão discutidos trabalhos que tratam de restrições ocasionadas pelo atraso intrínseco na transmissão de dados neste tipo de rede, principalmente, a inconstância do valor deste atraso. Quando se trata de atraso no recebimento de pacotes enviados pelos sensores das plantas para o controle, este pode ser sempre avaliado a cada pacote que chega ao controlador, mas pacotes que são enviados pelos módulos de controle aos atuadores podem ter seus tempos de chegada apenas estimados. Ainda ocorre o problema da perda de pacotes com sinais de estado ou de controle, seja por dados corrompidos ou simplesmente pelo descarte realizado por dispositivos de rede no caminho dos mesmos. Para suprimir problemas de indeterminismo, em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004) foi proposta uma topologia de rede IP, onde todos os pontos de conexão entre dispositivos são feitos por *switches*. Em (LIU *et al*, 2005) é proposta uma alternativa aos protocolos TCP e UDP com características mais adequadas a transmissões de pacotes RT. Em (CASAVOLA; PAPINI; FRANZÈ, 2006) é apresentada uma forma de se garantir estabilidade ao laço de controle. Na solução desenvolvida por (WANG; XU; WANG, 2005), procura-se compensar a variação de atraso que costuma degradar sistemas com preditor de Smith. Nas seções que seguem é feita uma abordagem destes trabalhos, onde alguns procuram tratar a questão melhorando o comportamento da rede IP e outros, formulam maneiras de compensar as condições da rede.

#### 3.1 DISTINÇÃO DE TIPOS DE TRÁFEGOS EM FILAS DIFERENCIADAS EM REDES ETHERNET COM *SWITCHES*

Em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004), foi feita uma análise do comportamento de uma rede apenas com terminais e *switches*. No experimento apenas um terminal foi admitido por porta do *switch*, ou outro *switch*. Não foi feito o uso de *hubs*, evitando-se colisões de acesso à rede. Foi utilizada a estrutura de filas descrita no padrão IEEE 802.1D/Q, que se

baseia em diferenciação de tráfego e múltiplas filas. A prioridade das filas dos *switches* poderiam ser classificadas em até 8 níveis.

Em uma rede IP, os pacotes podem percorrer diversos caminhos diferentes para atingir um mesmo destino e, por vezes um pacote pode voltar ao seu destino fazendo um laço. Para evitar isso, a rede deve ser compatível com o protocolo *Spanning Tree*. O modelo de tráfego adotado foi o mestre/escravo, implicando na presença de pelo menos uma estação de controle responsável por receber quadros com informações de estações escravas. O que segundo (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004) é coerente com perfis de redes de automação, onde é freqüente o uso de coordenação de atuadores e sensores.

Foi definida uma equação para o atraso máximo para cada fila, onde as filas são formadas por pacotes de mesma prioridade. O equacionamento foi baseado no pressuposto de que cada *switch* envolvido deve ter capacidade de processar o número de quadros gerados pelos dispositivos vizinhos e também, que a capacidade de fluxo da rede suporte o tráfego a ela destinado. Então, em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004), o atraso total ( $D_T$ ) sofrido pelos quadros de dados com prioridade  $p$ , quando transmitidos entre qualquer par de estações distintas pode ser definida por

$$D_T(p) = T_F + T_{\text{prop}} + T_Q(p) \quad (21)$$

onde:

- $T_F$ : tempo consumido com a inserção de quadro de cada canal tratado;
- $T_{\text{prop}}$ : tempo de propagação do quadro;
- $T_Q$ : tempo de espera que cada quadro possivelmente espera nas filas formadas

nos switches do caminho.

Concluí-se que com tal topologia e o equacionamento lá proposto, é possível se prever limites para o atraso de classes diferentes de tráfego. Um dos objetivos focados foi o ambiente de automação baseado em sistemas de controle distribuídos e comunicação mestre/escravo. A partir disso, foi deduzido que redes baseadas em topologias com *switch* e mecanismos de diferenciação de tráfego, representam uma tecnologia promissora para sistemas de tempo real.

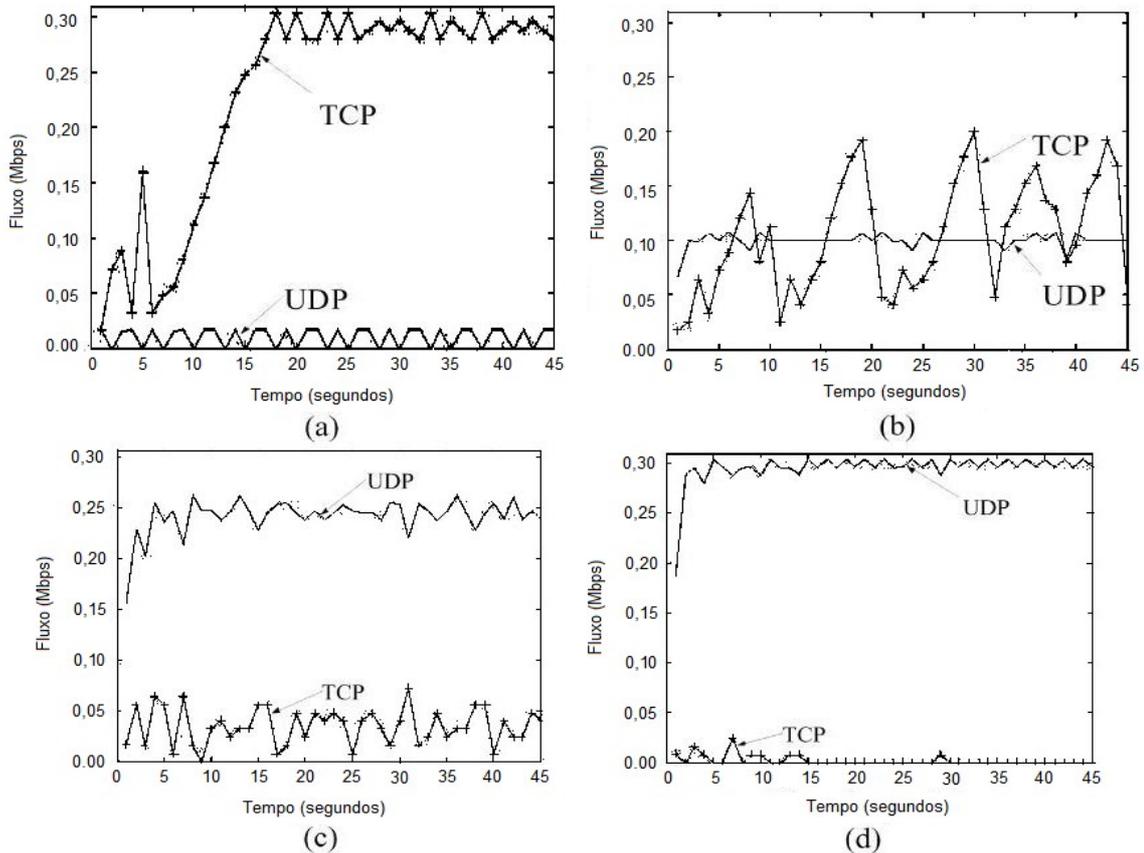
Foi salientado ainda, que em ambientes industriais o uso desta estrutura pode representar um passo importante para convergir diferentes níveis adotados em arquiteturas comumente usadas.

### **3.2 ARQUITETURA DE TRANSMISSÃO PONTO A PONTO PARA CONTROLE REMOTO DE ROBÔS VIA REDES IP**

Conforme (LIU *et al*, 2005), o primeiro robô teleoperado via Internet apareceu em 1994. Por volta de 2001, mais de 40 destes sistemas foram postos *on-line*. Com o uso surgiram algumas dificuldades a serem resolvidas, como por exemplo, a necessidade de novas técnicas para coordenar mais de um usuário simultaneamente. Erros não previstos tiveram que ser tratados, cuidados foram tidos para garantir confiabilidade e privacidade. Restrições importantes como a variação de tempo e a limitação de capacidade de fluxo são intrínsecas à rede Internet. Os gráficos da Figura 14, obtidos em (LIU *et al*, 2005), mostram o comportamento do tráfego de pacotes quando uma transmissão UDP e outra TCP compartilham um *link* relativamente limitado para o *throughput* aplicado. Neste experimento foram transmitidos quadros de dados quaisquer, sem prioridades diferenciadas, apenas com o intuito de gerar o fluxo necessário para o experimento.

A diferença entre os experimentos (a), (b), (c) e (d) da Figura 14, é que cada um deles tem uma taxa de transmissão UDP diferente, fixada pelo operador do sistema. A taxa da transmissão TCP se ajustou automaticamente ao que restou da capacidade da banda de 300

kbps. O gráfico (b) da Figura 14 representa a situação em que as duas transmissões compartilham porções similares da banda disponível, mas observa-se uma maior flutuação na transmissão TCP, que está se auto-ajustando.



**Figura 14: Um fluxo UDP e um TCP compartilham um *link* com banda limitada em 300 kbps (LIU *et al*, 2005).**

Como o protocolo UDP não tem informações quanto a entrega dos pacotes enviados assim como também não tem informações do estado da rede utilizada, quando uma seqüência de pacotes é enviada, o uso da capacidade de envio do *link* pode estar sendo demasiada, ou da mesma forma também pode estar sendo subutilizada como se pode ver em (d) e (a) da Figura 14 respectivamente. O TCP, por sua vez, tem uma realimentação das condições de rede e isso faz com que sua transmissão varie com as condições da rede, mas pode chegar a níveis de transmissão muito baixos. Usando-se tanto TCP quanto UDP, segundo (LIU *et al*, 2005),

verifica-se que ambos não são adequados isoladamente para transmissão de dados em tempo real. Para serem adaptados para RT, foram feitos estudos e surgiram adaptações como *TCP-friendly Rate Control Protocol* (TFRC), *Rate based Adaptation Protocol* (RAP), *Loss-Delay Adjustment Protocol* (LDA), *Square-Increase/Multiplicative Decrease* (SIMD) *Protocol* e o *Real-Time Transport Protocol* (RTP). Estes mecanismos foram feitos em especial para *streams* de multimídia. Embora o envio destas exija algum tratamento de RT, são diferentes dos requisitos RT exigidos para o controle de robôs remotos. Para multimídia costumam-se usar *buffers* de recepção para serem tratadas as variações de atraso. Em (LIU *et al*, 2005), diz-se que normalmente tal tratamento não é adequado para se controlar remotamente um robô via Internet. Ainda consta que os eventos no devido tempo são importantes para este paradigma: comandos e sinais deveriam ser enviados assim que disponíveis. Também as curvas de taxa de transmissão são diferentes sob condições de variação de taxa. Para multimídia, variações moderadas são bem aceitas pelo sistema com *buffer*, desde que não se esvazie ou se ultrapasse os seus limites. Para robôs teleoperados, as restrições quanto à variação são mais rigorosas, por exemplo, normalmente é desejado que a taxa de transmissão suba rapidamente para seu estado de regime permanente quando há uma recuperação de banda.

Tais diferenças entre multimídia e robôs acima citadas já foram também reconhecidas por diversos trabalhos. No entanto, segundo (LIU *et al*, 2005), pouco foi feito e então é proposto um novo tratamento na transmissão de controle para robôs via Internet. Trata-se, como principal aspecto, do protocolo trinomial que é baseado em um protocolo de transporte com um mecanismo de controle de taxa e de congestionamento compatível com TCP. Pela escolha de três parâmetros do protocolo, busca-se o comportamento de curva de taxa de transmissão desejado. O protocolo é *TCP-friendly*<sup>1</sup>. Para evitar atrasos e *jitters* de atraso, não há mecanismos de retransmissão.

---

<sup>1</sup> *TCP-friendly*: é dito que um fluxo é *TCP-friendly* se a taxa de transmissão não exceder a de uma conexão TCP nas mesmas circunstâncias (FLOYD & FALL, 1999).

Inspirado no SIMD é proposto um novo protocolo de transporte baseado na taxa, como segue:

- aumento de taxa:

$$S_t = S_o + \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\gamma, \quad \alpha \geq 1 \cup \gamma \geq 0 \quad (22)$$

- diminuição de taxa:

$$S_{t+} = (1 - \beta)S_t, \quad 0 < \beta < 1 \quad (23)$$

onde  $t$  usa unidades de *roundtrip* (RTTs);  $S_t$  é a taxa de envio em  $t$ ;  $S_o$  é a taxa após a última diminuição;  $S_{t+}$  é a taxa imediatamente após  $t$ , significando que o ajuste ocorre imediatamente;  $\alpha$ ,  $\gamma$  e  $\beta$  são constantes não negativas. Em função destas três constantes ajustáveis, este protocolo foi chamado de trinomial.

Verificou-se que em regime permanente a curva de transmissão é mais suave que a do TCP, enquanto que a resposta de aumento ou diminuição são mais rápidas.

A IETF argumenta que qualquer novo protocolo deve ser compatível com TCP (*TCP-friendly*), desde que este é o predominante na Internet. O TCP funciona da seguinte forma para tratar congestionamentos: os roteadores simplesmente descartam pacotes quando congestionados. Desta forma, os *hosts* das pontas são informados quanto ao congestionamento e procuram ajustar a taxa de transmissão.

*TCP-friendly* se refere aos protocolos cuja taxa de recepção não excede a que o protocolo TCP teria sob as mesmas condições, ou seja,

$$\lambda_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{R\sqrt{2p}} \quad (24)$$

onde  $\lambda_{\max}$  é a taxa de envio máximo em pacotes/segundo do novo protocolo,  $R$  é o RTT e  $p$  é a probabilidade de perder pacotes. Logo, os parâmetros  $\alpha$ ,  $\gamma$  e  $\beta$  devem ser escolhidos de tal forma que o novo protocolo seja *TCP-friendly*.

Os autores demonstram que o protocolo trinomial é *TCP-friendly* se satisfaz a condição:

$$\alpha \geq \frac{(r+1-r\beta)\Gamma(r+1)^{(1/r)}S_o^{((\gamma-1)/\gamma)}}{1,5(r+1)(\beta)^{(1/r)}(1-\beta)^{((r-1)/r)}} \quad (25)$$

Também é apresentado o gráfico da Figura 15 para demonstrar o compartilhamento dos recursos de rede entre duas aplicações que usam este protocolo e lhes são atribuídos os mesmos valores para  $\alpha$ ,  $\gamma$  e  $\beta$ . O símbolo  $x_i$  representa o recurso alocado pela aplicação  $i$ ,  $P_i$  são pontos da trajetória da curva que tende a linha de compartilhamento justo em cada instante  $t$ .

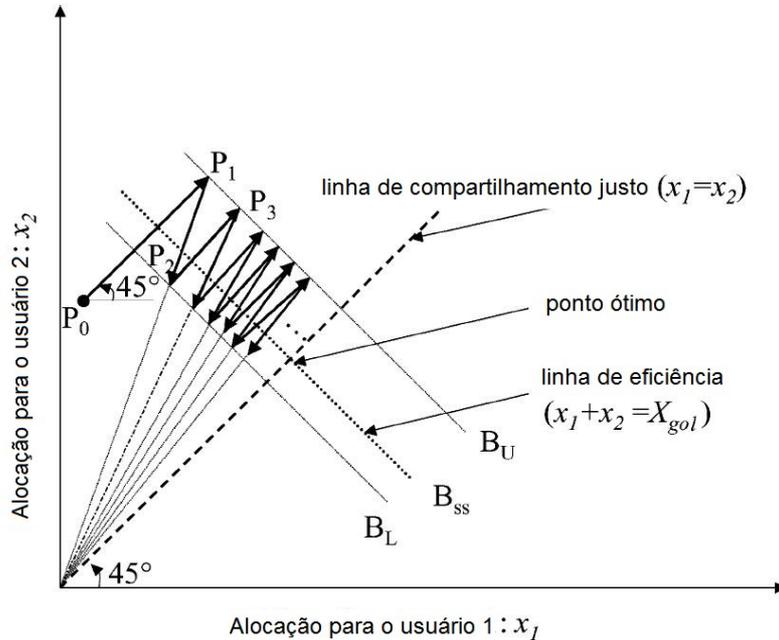


Figura 15: A dinâmica do protocolo trinomial para o caso de dois usuários (LIU *et al*, 2005).

Por meio de experimentos de (LIU *et al*, 2005), foram obtidos os gráficos da Figura 16 e Figura 17 abaixo, com o comportamento do protocolo TCP e o trinomial respectivamente.

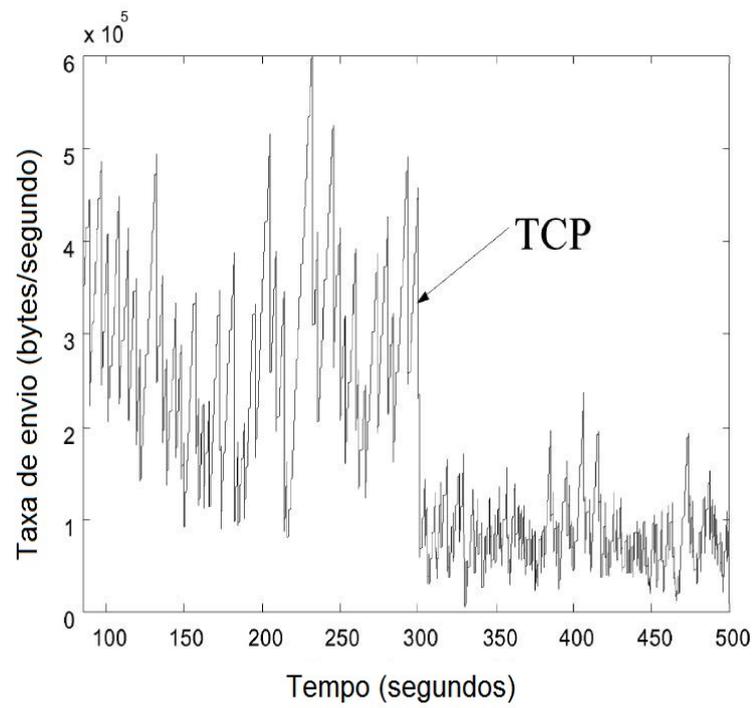


Figura 16: Resposta do fluxo TCP ao decréscimo de banda (LIU *et al*, 2005).

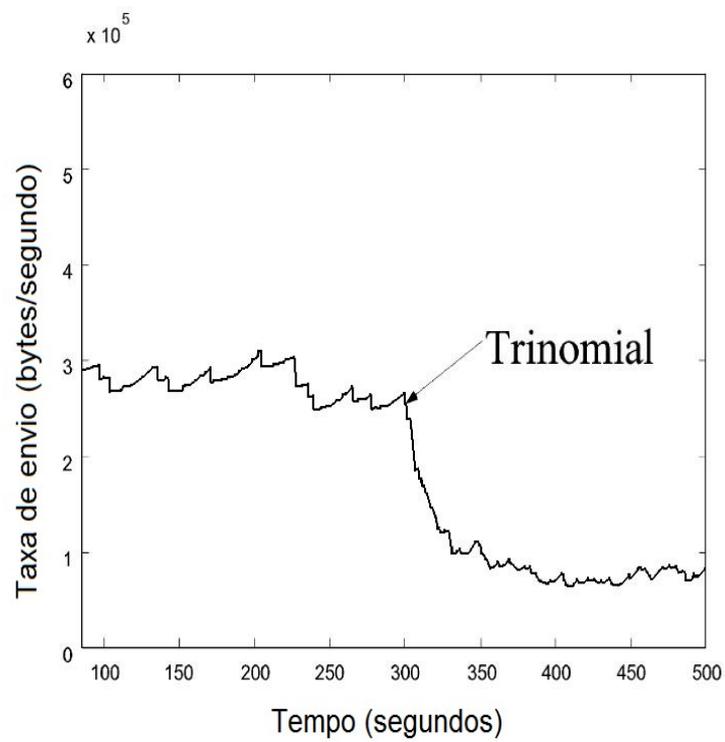
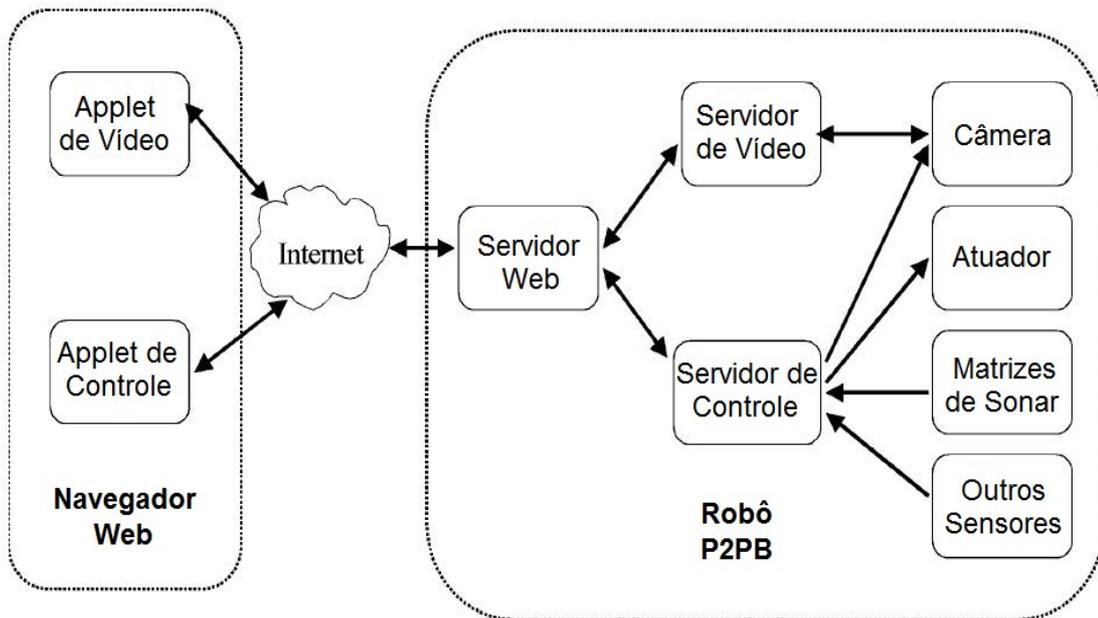


Figura 17: Resposta do fluxo trinomial ao decréscimo de banda (LIU *et al*, 2005).

Após estas deduções, foi implementado um experimento sobre a Internet com um robô móvel. O experimento está exposto na Figura 18, onde P2PB é um *Active Media* comercial, *Pioneer 2 People Bot mobile robot*.



**Figura 18:** Arquitetura do sistema de *software* (LIU *et al*, 2005).

Segundo os autores, UDP não deveria ser usado por nenhum tipo de aplicação sobre a Internet, pois ele não observa as condições da banda sobrecarregando-a muitas vezes ainda que sem este propósito. Portanto, o protocolo usado para ser comparado com método do trinômio, foi o TCP. Como a análise se torna mais fácil graficamente, pode ser vista a comparação nas Figura 19 e na Figura 20.

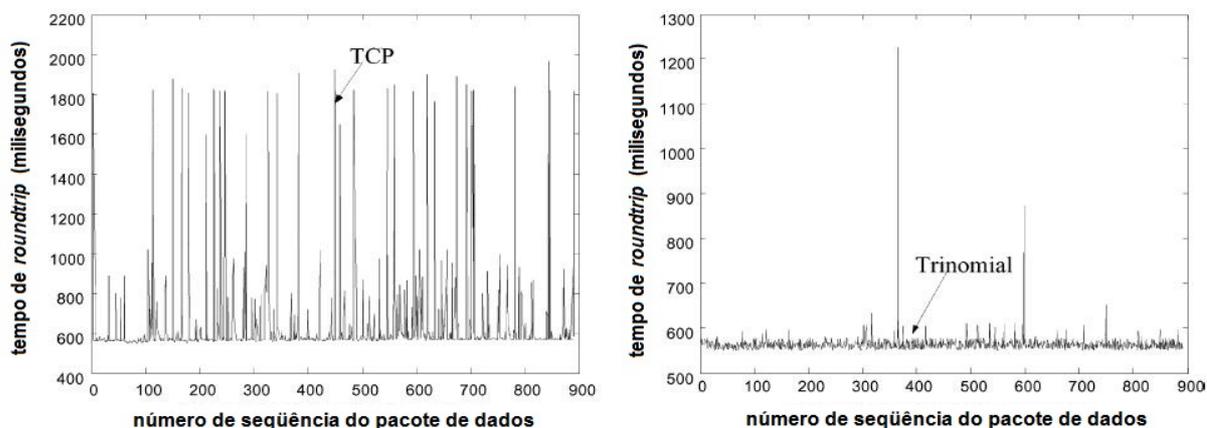


Figura 19: Comparação de atraso e *jitter* (LIU *et al*, 2005).

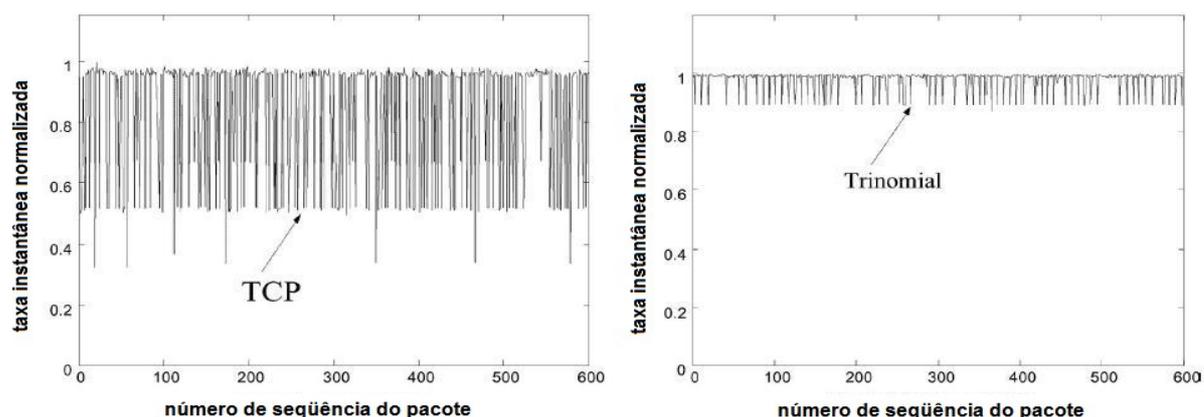


Figura 20: Comparação experimental entre as taxas de transmissão (LIU *et al*, 2005).

Foram considerados mais importantes para a comparação, o atraso e a variação da taxa (*smoothness*) de transmissão. Enquanto o atraso médio via TCP foi de 651,96 ms, para o protocolo trinomial foi de 564,45 ms. A queda no atraso se deve ao fato de que a taxa de transmissão no protocolo trinomial não baixa abruptamente a cada sinal de congestionamento da rede.

Neste estudo (LIU *et al*, 2005) são identificadas quatro classes de dados: administrativos, comandos de controle, imagem e outras informações. Como segue:

- Dados administrativos (tais como controle de acesso, validação de usuário e dados de configuração): pacotes pequenos, uma única transmissão para todos, sem requisitos RT, mas requer confiabilidade de transmissão;

- Valores de referência (tais como velocidade de translação desejada e ângulo de rotação): pacotes pequenos, transmissão não periódica, com requisitos RT e prefere-se a informação mais recente aos pacotes perdidos;

- Dados de imagem (a realimentação de informação mais importante e dispendiosa): pacotes grandes, transmissão periódica, requerem transmissão RT, necessita banda significativa e também, a informação mais recente é preferida aos pacotes perdidos;

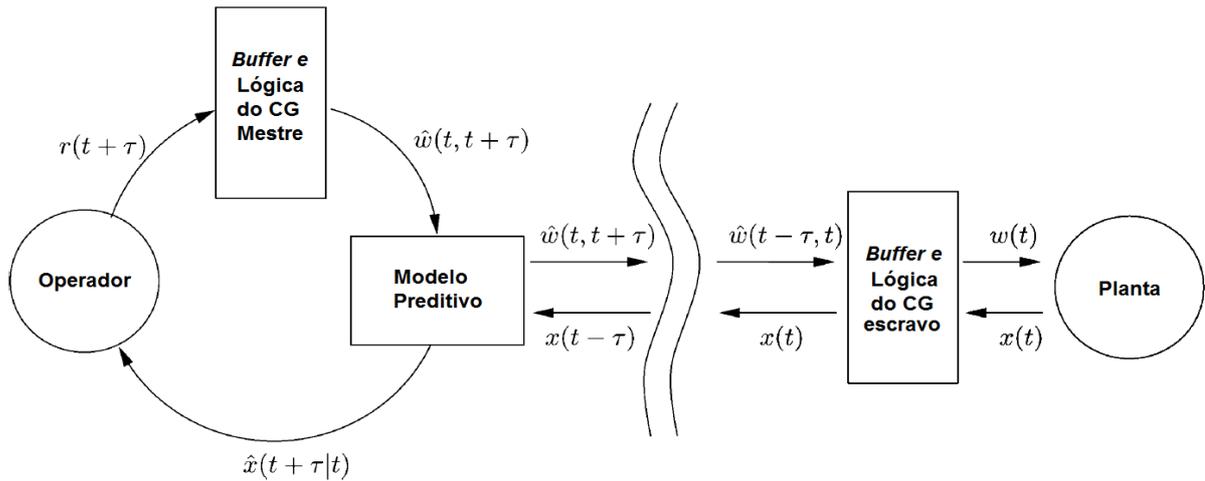
- Outras informações sobre o cenário e o robô (tais como a posição e a velocidade do robô e variações): pacotes pequenos, transmissão periódica, requer transmissão RT e prefere-se informações mais recentes aos pacotes perdidos.

Como descrito acima, em determinadas classes de dados, pacotes perdidos ou muito atrasados não devem ser retransmitidos, mas sim substituídos por dados mais recentes. Neste caso, embora discordem os autores de (LIU *et al*, 2005), UDP pode ser considerado um protocolo mais adequado, considerando que não há retransmissão e a taxa pode ser mantida constante. O controle da taxa de transferência, para não sobrecarregar o enlace de rede (*link*), pode ser controlado por mecanismos de camadas superiores, por exemplo, usando-se o auxílio de RTP e RTCP descritos em (SCHULZRINNE; CASNER; FREDERICK, 2003).

### **3.3 SUPERVISÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS EM REDES SOB RESTRIÇÕES DE COORDENAÇÃO**

Apresenta-se em (CASAVOLA; PAPINI; FRANZÈ, 2006) uma estratégia de controle preditiva discreta no tempo para supervisão de NCS. O método usado baseia-se em idéias usadas para sintetizar unidades de *Command Governors* (CG). Generaliza-se para permitir uma implementação mestre/escravo que também leva em consideração os atrasos.

Um CG é um dispositivo não linear que é adicionado a um sistema de controle pré-compensado. O último, na ausência de CG, é projetado de forma a ter um desempenho satisfatório em sistemas lineares. Sempre que necessário, o CG modifica a referência para o sistema de laço fechado de forma a evitar violação de restrições.



**Figura 21: Estrutura do sistema com lógica CG no instante  $t$  (CASAVOLA; PAPINI; FRANZÈ, 2006).**

Para um único escravo, a Figura 21 demonstra o esquema básico. Onde  $\tau$  é uma constante assumida por um breve momento. A idéia principal é que a cada instante  $t$ , deve ser aplicada ao escravo a referência  $r(t + \tau)$ , pois esta referência chegará ao escravo no instante aproximado  $t + \tau$ . Também em (CASAVOLA; PAPINI; FRANZÈ, 2006), cita-se que esta situação pode ocorrer, por exemplo, em um operador visualizando a planta por meio de um supervisor que cria imagens a partir da predição do estado  $\hat{x}(t + \tau | t)$ , mas a aplicação direta de  $r(t + \tau)$  na planta pode violar alguns limites das variáveis do sistema. Por isso, o sinal  $r(t + \tau)$  deve passar pelo CG mestre como mostra a Figura 21, o qual deve modificar o sinal se necessário, gerando  $\hat{w}(t, t + \tau)$  (lê-se: gerada no instante  $t$ , para ser aplicada no instante  $t + \tau$ ). Se o comando não estiver disponível, o CG escravo é instruído para aplicar o

último comando,  $w(t) = w(t - 1)$ . Demonstra-se em (CASAVOLA; PAPINI; FRANZÈ, 2006) que esta escolha assegura estabilidade e respeito às restrições.

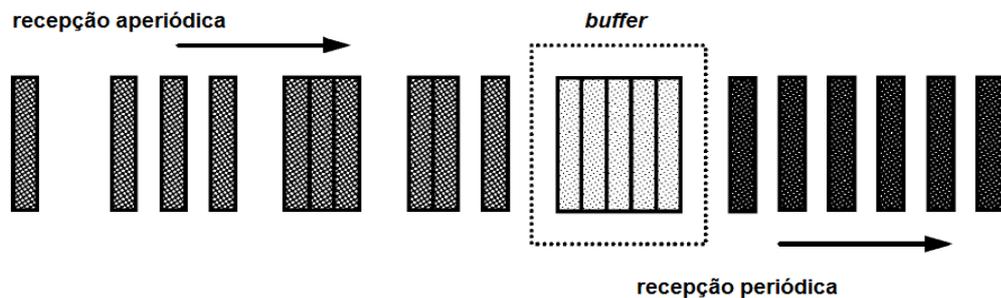
### 3.4 PREDITOR DE SMITH E O ATRASO VARIANTE EM REDES IP

O preditor de Smith foi abordado anteriormente considerando-se atrasos constantes ou com pequenas variações causadas durante a vida útil da planta. No entanto, o objetivo deste trabalho é procurar soluções para o controle de dispositivos via redes IP, cujo atraso se mostra bastante variável, podendo ser sensível de um pacote de controle para outro. Em (BAUER *et al*, 2001), esta característica é tratada dentro de uma malha de controle fechada com o módulo do preditor de Smith, ajustando-se o atraso do preditor com estimativas do atraso real da rede.

Foi visto que o sistema pode se desestabilizar se o modelo não representar de forma muito próxima a planta real. Perturbações e pequenos erros de modelamento são compensados pela realimentação da planta para o controlador. Segundo (BAUER *et al*, 2001), para que qualquer preditor de Smith funcione adequadamente sob qualquer condição de tráfego, a conexão com a rede deve ser modelada contando com variações no atraso. O trabalho apresenta um mecanismo de controle de filas com o objetivo de tratar as variações de atraso e possíveis esvaziamentos de *buffers*.

Em (WANG; XU; WANG, 2005), também é feita uma abordagem do problema, usando-se o preditor de Smith e modelando-se o atraso entre dois pontos na Internet. Neste modelo alguns parâmetros são obtidos por estatísticas e experiência dos pesquisadores com relação ao comportamento do atraso. Seus experimentos mostram bom resultados, mas não servem como garantia de determinismo para aplicações do tipo *hard real-time*. Um dos pressupostos do modelo foi de que a rede tende a manter o mesmo fluxo atual de pacotes no instante seguinte, esta característica foi chamada de *self-similar*. Desta forma, o atraso ou

fluxo do tráfego foi considerado previsível dentro de algumas escalas de tempo. Pressupõe-se então que o atraso  $T$  em função do tempo ( $T(t)$ ) é menor ou igual a  $\tau$ , onde  $\tau$  é constante no instante  $t$ . Para pequenas variações (*jitter*), foram introduzidos *buffers* do tipo *Network Delay Regulator* (NDR) tanto do lado do controlador como da planta. Estes *buffers* funcionam de acordo com a Figura 22, onde pacotes são recebidos com *jitter* e são passados adiante sincronizados com o período correto de recepção. Nesta figura pode-se verificar que alguns pacotes chegam ao receptor (*buffer*) com diferentes intervalos de tempo, alguns chegam sem intervalo entre eles e outros chegam isolados por intervalos maiores do que o esperado. O número de pacotes que devem ser armazenados no *buffer* deve ser o suficiente para suprir a saída enquanto não são recebidos novos pacotes, considerando o maior atraso de recepção.



**Figura 22: Princípio do *Network Delay Regulator* (NDR).**

Após os dados oriundos da planta passarem pelo NDR, estes foram utilizados para realimentar o controlador com preditor de Smith. Na Figura 23 encontra-se a representação do sistema com preditor de Smith e o auto-ajuste de atraso.

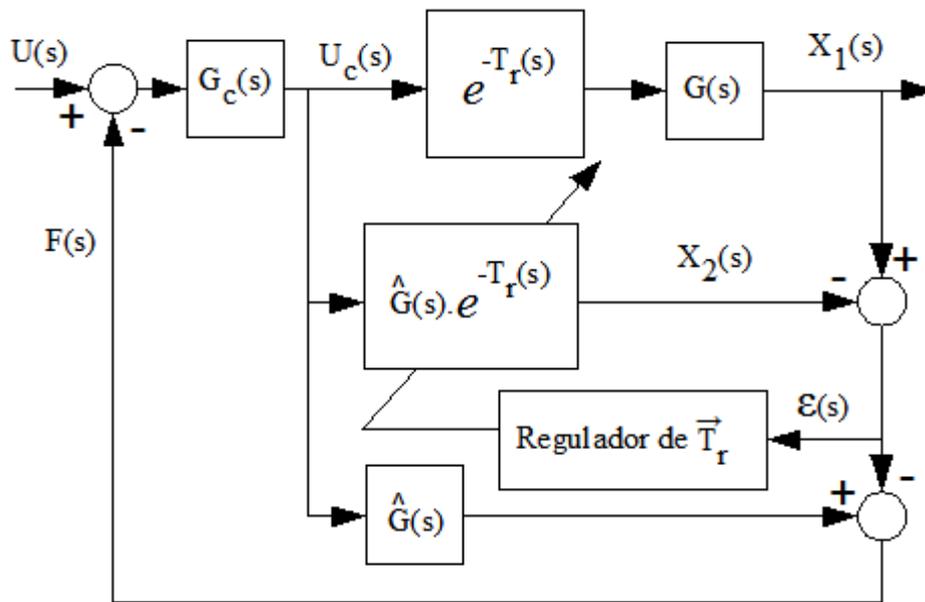
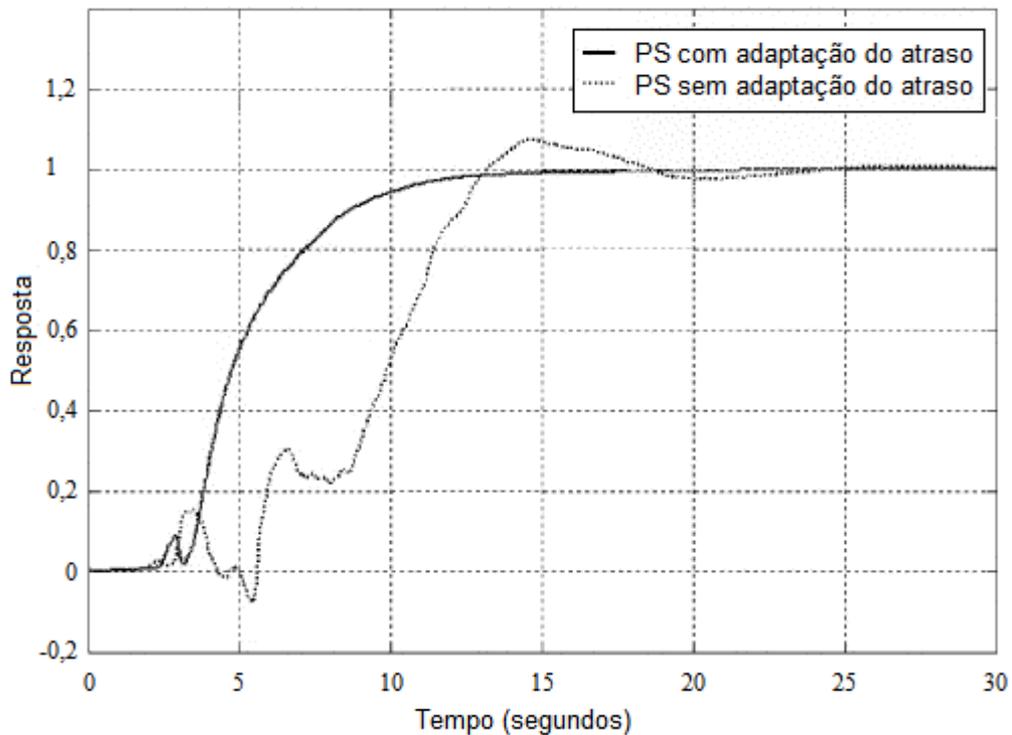


Figura 23: Preditor de Smith com regulador de atraso (WANG; XU; WANG, 2005).

A variação na predição do atraso se dá pela equação (26), onde  $\alpha$  é uma constante positiva. Em (WANG; XU; WANG, 2005) pode-se ver em detalhe a dedução desta equação, que relaciona proporcionalmente a saída  $X_1(s)$  da planta e a taxa de variação do erro  $s\epsilon(s)$  com a variação do atraso  $\Delta \vec{T}_r(s)$ .

$$\Delta \vec{T}_r(s) = \alpha s \epsilon(s) X_1(s) \quad (26)$$

Foram feitos experimentos sobre uma rede que conecta equipamentos entre Guangzhou e Beijin, na China. O *roundtrip* médio foi de 512 ms, o máximo de 918 ms e o mínimo de 46 ms. Na Figura 24, obtida em (WANG; XU; WANG, 2005), pode-se ver que com o ajuste no atraso do modelo do preditor de Smith a resposta obteve um melhor resultado do que sem o ajuste.



**Figura 24: Teleoperação baseada em preditor de Smith, com e sem adaptação de atraso (WANG; XU; WANG, 2005).**

### 3.5 CONTROLE EM TEMPO REAL DE ROBÔS ATRAVÉS DE REDES IP

Em (ALT, 2003), foi proposta uma solução para o controle de um robô via rede IP. Nesta foi criado um protocolo de comunicação que permite transmitir, além do próprio sinal de controle e dos sensores, também os tempos envolvidos no processo de transmissão pela rede. O controlador, que tem o seu relógio sincronizado com o do robô, ao receber um pacote de informações proveniente do robô, têm a informação exata do atraso no percurso deste pacote. Com esta informação de tempo de atraso, no sentido da planta para o controlador, é possível se estimar o estado do robô no momento do cálculo da lei de controle. Já no sentido do controlador para a planta, o melhor que se pode ter, é uma estimativa do atraso quando o sinal de controle chegar ao robô, baseando-se em tempos de *roundtrip* anteriores.

Para melhorar o resultado, (ALT, 2003) fez estimativas do estado do robô para diferentes valores de atraso, dentro de uma faixa de tempo na qual o sinal de controle deve ser recebido pelo robô. Para cada estimativa de estado, foi gerado um sinal de controle diferente. Ao chegar ao robô o pacote com diversos cálculos da lei de controle, um algoritmo simples se encarrega de escolher o sinal de acordo com o atraso associado a este e o atraso ocorrido de fato.

Os resultados apresentados, por meio de comparação gráfica das curvas de respostas geradas em ensaios com e sem a compensação proposta, demonstrou um bom desempenho da solução. Tais resultados estão expostos nas Figura 25, Figura 26 e Figura 27. Uma junta do robô deve ser levada a posição de  $90^\circ$  em regime permanente e outra a  $45^\circ$ , sendo a trajetória da primeira representada pela linha contínua ( $q_1(t)$ ) e da segunda pela linha tracejada ( $q_0(t)$ ). A Figura 25 é o resultado de um ensaio com controle local, i.e., sem a rede IP entre o controlador e a planta. Na Figura 26 estão as curvas do ensaio com a rede IP no laço de controle, porém sem a compensação proposta. Por último, na Figura 27 está o resultado do trabalho, com a compensação de atrasos do controlador para o robô e também no sentido contrário.

Percebe-se que o controle sem a devida compensação dos atrasos resultou na degradação do sistema. Já no sistema com atrasos compensados, o comportamento da resposta do objeto controlado foi similar aquele obtido no controle local.

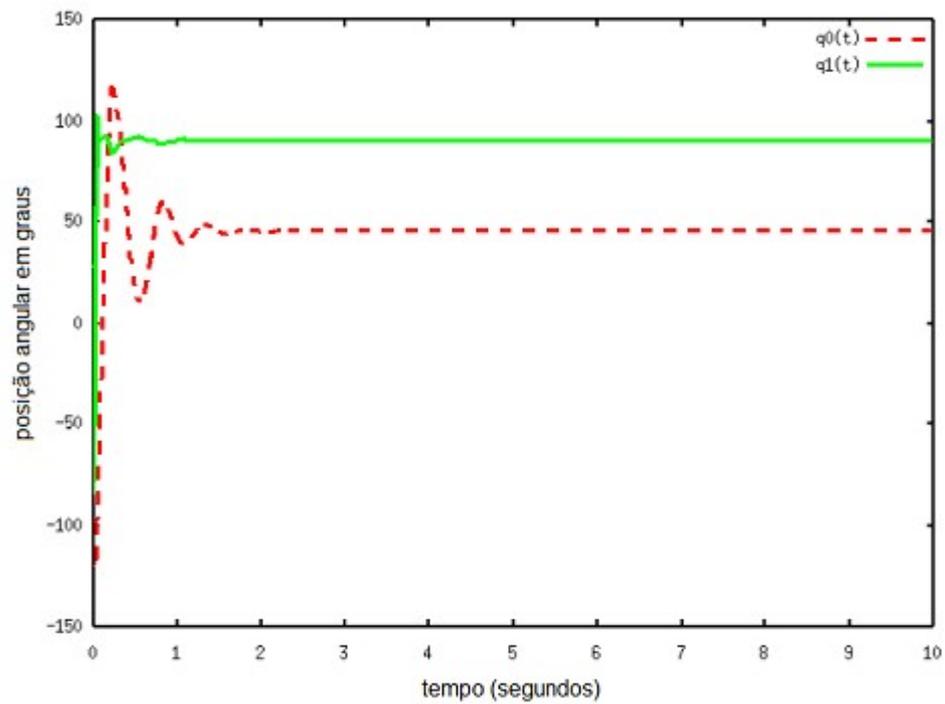


Figura 25: Ensaio do controle local de 2 juntas de um robô realizado em (ALT, 2003).

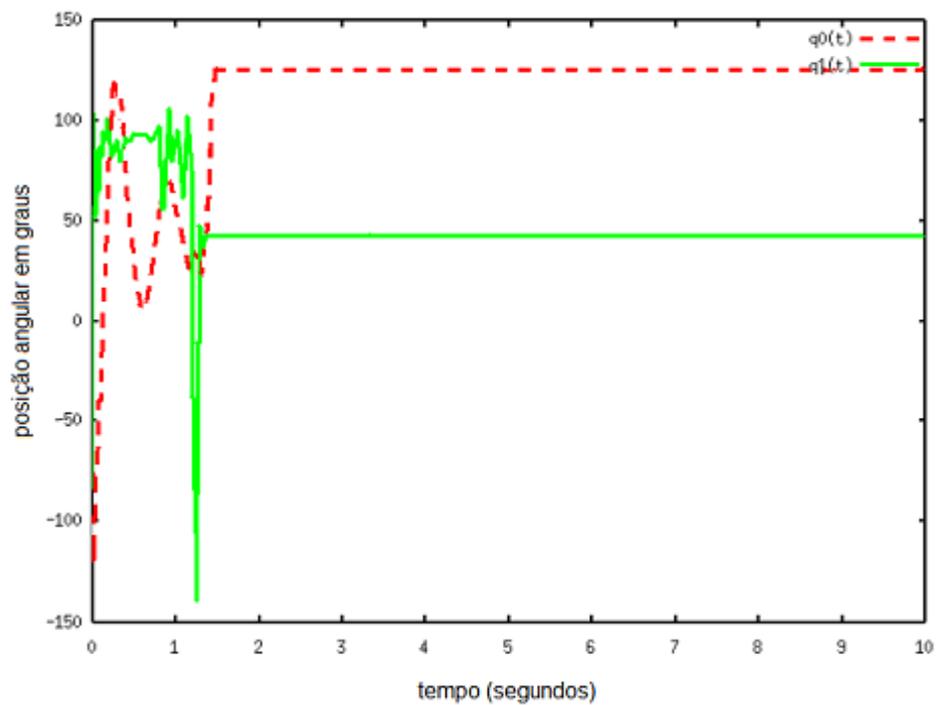
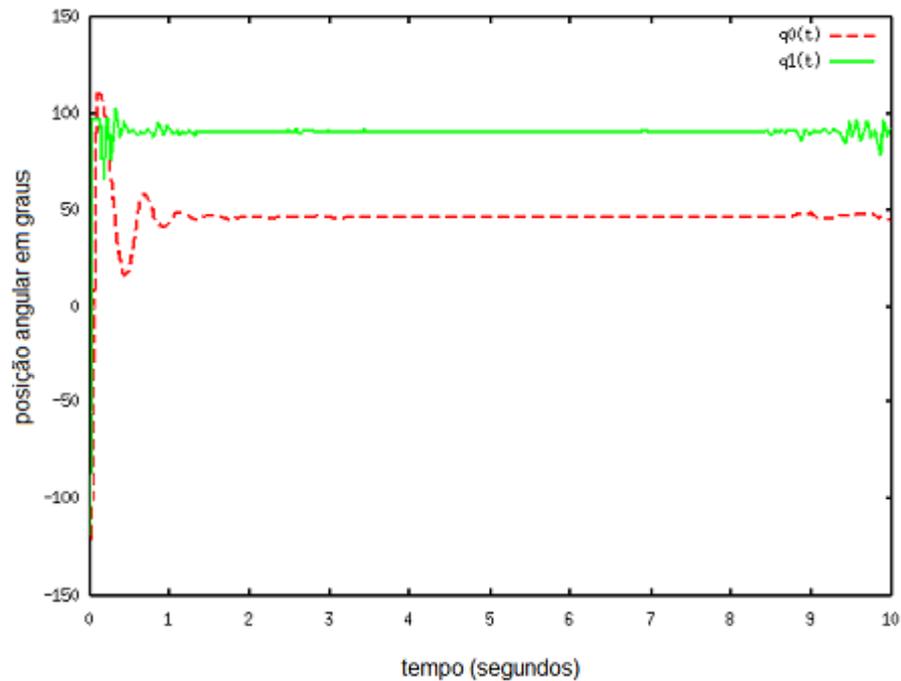


Figura 26: Ensaio do controle sem compensação de atrasos via rede IP de 2 juntas de um robô realizado em (ALT, 2003).



**Figura 27: Ensaio do controle com compensação de atrasos via rede IP de 2 juntas de um robô realizado em (ALT, 2003).**

**Tabela 1: Desempenho do sistema de controle local e via rede com compensações dos atrasos robô/controlador e controlador/robô (ALT, 2003).**

|  | Junta 1        |                   | Junta 2        |                   |
|--|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
|  | Controle Local | Controle via Rede | Controle Local | Controle via Rede |
| Sobrepasso (%)                                   | 43,36          | 39,400000         | 6,430000       | 3,270000          |
| Tempo de acomodação (segundos)                   | 1,410000       | 1,580000          | 0,270000       | 1,330000          |
| Tempo de subida (segundos)                       | 0,135000       | 0,074000          | 0,020000       | 0,030000          |
| Tempo de pico (segundos)                         | 0,200000       | 0,090000          | 0,020000       | 0,030000          |
| Critério ISE (radianos <sup>2</sup> )            | 79,781163      | 64,170254         | 11,442553      | 34,656327         |
| Critério IAE (radianos)                          | 70,345356      | 70,404001         | 11,690898      | 26,216694         |
| Critério ITSE (radianos <sup>2</sup> x segundos) | 11,065322      | 9,271035          | 0,162825       | 4,071319          |
| Critério ITAE (radianos x segundos)              | 61,041562      | 137,800391        | 23,857616      | 70,026397         |

## 4 PROPOSTA DE ESTRATÉGIAS PARA LIDAR COM INDETERMINISMO TEMPORAL

O presente capítulo descreve a abordagem proposta neste trabalho, a qual segue a linha de propostas anteriores, (ALT, 2003) e (WANG; XU; WANG, 2005), que abordam a compensação do atraso variante junto ao compensador e planta. O capítulo inclui uma descrição conceitual da proposta e sua validação através da realização de experimentos por meio de simulação. Na presente proposta, similarmente ao trabalho de (WANG; XU; WANG, 2005), um preditor de Smith é usado para ajuste de atraso a cada novo cálculo de lei de controle, porém a nova forma com que é feito este ajuste se mostra eficiente para ordens de atraso e variações típicas de redes IP. Trata-se de um algoritmo mais simples que o desenvolvido em (WANG; XU; WANG, 2005), aproveitando a possibilidade de ter a informação do atraso real a cada pacote, adaptando rapidamente o atraso imposto à saída do modelo. Não serão feitas alterações na camada de transporte, como proposto em (LIU *et al*, 2005), apenas na camada de aplicação, ou seja, nos programas que implementam o controlador e no dispositivo que recebe e aplica o sinal de controle na planta.

No instante  $t$ , o sinal  $u(t)$ , sinal de saída do controlador  $C$ , é aplicado no sistema sendo controlado ( $G_p$ ). Também neste instante é enviado da planta um pacote com a leitura dos sensores,  $y(t)$ , com o tempo de atraso do controlador para planta,  $\theta_{cp}$  obtido da diferença entre o *timestamp* do pacote de controle recebido e a hora da recepção, e a hora em que este pacote está sendo enviado,  $t$ . Ao chegarem estas últimas informações ao controlador, no instante  $t_1$ , é calculado o atraso  $\theta_{pc}$  da planta para o controlador por

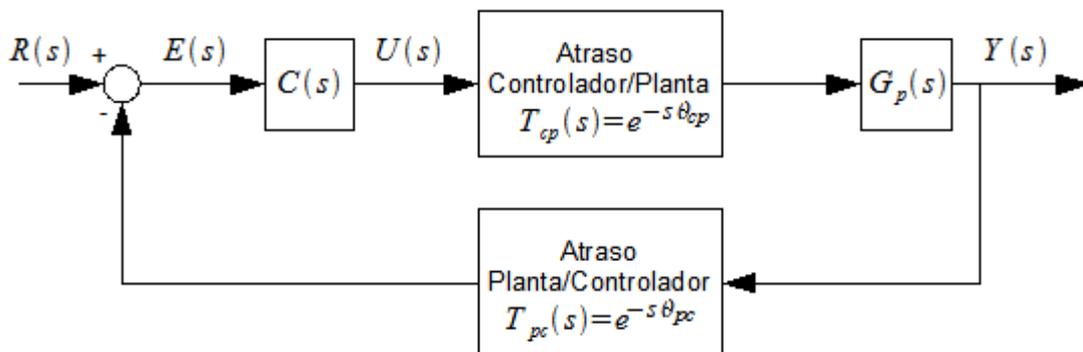
$$\theta_{pc} = t_1 - t \quad (27)$$

que é somado ao tempo de atraso do controlador para a planta,  $\theta_{cp}$ , contido nas informações do pacote, para ser obtido o tempo de *roundtrip*  $\theta_{rt}$ , ou seja

$$\theta_{rt} = \theta_{cp} + \theta_{pc} \quad (28)$$

Os tempos de processamento dos sinais tanto no controlador como na recepção junto a planta foram desconsiderados, pois são desprezíveis frente a grandeza dos atrasos na rede nos experimentos a seguir realizados.

A Figura 28 mostra parte do sistema convertido para o domínio freqüência, com os atrasos envolvidos.



**Figura 28: Malha de controle parcial com seus respectivos atrasos.**

A Figura 29 apresenta a malha de controle com os blocos do preditor de Smith e do adaptador de atraso. Na direção do fluxo desta figura, o bloco  $G_p(s)$  deveria aparecer depois do bloco que representa o atraso de transporte inserido devido a presença da rede do controlador até a planta, mas estes foram dispostos convenientemente para ser obtido o sinal  $B(s)$  na representação. A saída  $Y_p(s)$  não é alterada em função desta disposição de blocos. O sinal  $B(s)$  é o princípio para o preditor de Smith. O laço de realimentação do sistema retorna os sinais da saída da planta e dos sinais com e sem atraso da saída do modelo da planta. Para ser obtida a saída do modelo com atraso, o sinal do modelo passa por um bloco que ajusta constantemente o atraso a ser aplicado. Como foi realizado em (ALT, 2003),

os pacotes enviados pela rede IP contém informações adicionais de tempo juntamente com a leitura de sensores da planta. O pacote enviado pelo controlador contém além do sinal de controle, a hora em que o pacote foi enviado, para que um algoritmo simples junto a planta possa calcular o tempo transcorrido até a sua chegada, o  $\theta_{cp}$ . A planta, ao enviar os seus dados, inclui o  $\theta_{cp}$  calculado e a hora em que o seu pacote esta sendo enviado (*timestamp*). Ao chegar no controlador, este pode com os dados de tempo recebidos, calcular o tempo de *roundtrip*, i.e., a soma do atraso no sentido do controlador à planta com o atraso da planta ao controlador ( $\theta_{pc}$ ). A estrutura do quadro de dados enviado do controlador para a planta é apresentado na Figura 30 e a do quadro enviado da planta para o controlador pela Figura 31 .

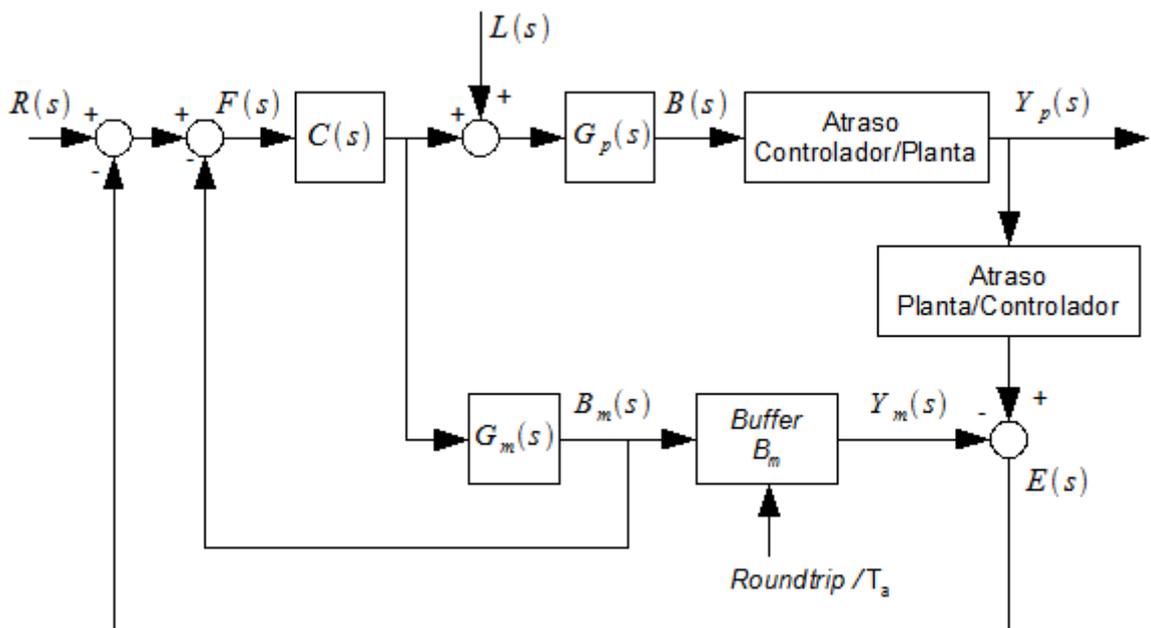


Figura 29: Solução proposta com Preditor de Smith e atraso ajustável.

|              |                  |                    |
|--------------|------------------|--------------------|
| tipo de ação | <i>timestamp</i> | signal de controle |
|--------------|------------------|--------------------|

Figura 30: Quadro de dados enviado do controlador para a planta.

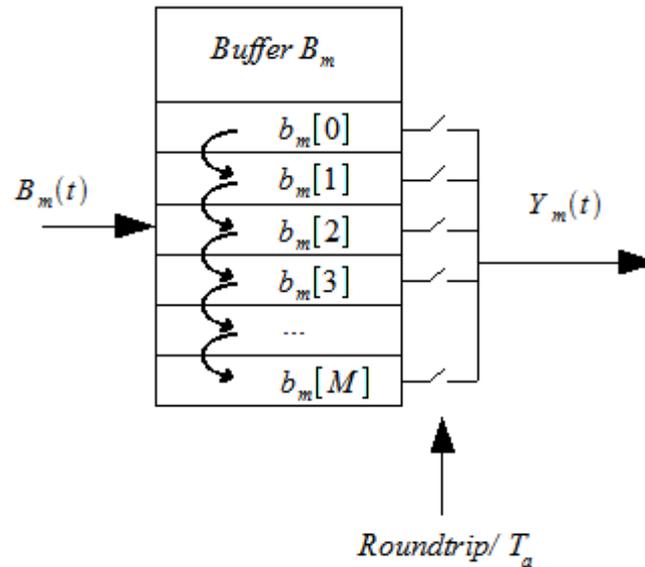
|  |  |                  |
|--|--|------------------|
| valores dos sensores<br>(estado da planta) | último atraso de transporte<br>do controle para a planta ( $\theta_{cp}$ ) | <i>timestamp</i> |
|--|--|------------------|

**Figura 31: Quadro de dados enviado da planta para o controlador.**

Ao mesmo tempo em que o sinal de controle é enviado para a rede IP, com o endereço da planta, também é aplicado o mesmo sinal na entrada do modelo da planta e o seu valor  $B_m$  é então guardado em uma estrutura de dados. Esta estrutura, o *Buffer*  $B_m$  da Figura 29, serve para o ajuste do atraso aplicado sobre o sinal da saída do modelo (sinal  $B_m(s)$ ). Os valores de  $B_m(s)$  armazenados, definidos a partir daqui de  $b_m$ , são usados como  $Y_m(s)$  de acordo com o momento em que chega o valor  $Y_p(s)$  no controlador. Os tempos de *roundtrip* e de amostragem definem o índice do valor guardado na estrutura que deve ser utilizado para obtenção de  $Y_m(s)$ . Cada valor nesta estrutura tem um índice  $i$ , onde  $i$  é um número natural, sendo 0 (zero) o do último valor guardado. O valor  $B_m(s)$  cujo índice associado é  $i$ , será representado por  $b_m[i]$ . A cada novo valor, os que já estavam na estrutura têm os seus índices incrementados de 1. Quando um valor de  $B_m(s)$  for receber um índice maior que o definido para o tamanho da estrutura, este é descartado. Esta estrutura de dados aqui denominada *Buffer*  $B_m$  é vista em detalhe na Figura 32. Nesta figura, cada novo valor de  $B_m(s)$  assume a posição de  $b_m[0]$ , enquanto os valores já armazenados em  $b_m[i]$  são deslocados para as posições  $b_m[i+1]$ . Os pacotes armazenados em seqüência no *Buffer*  $B_m$  diferem-se nos seus tempos de aquisição por um período de amostragem  $T_a$  do controlador. Para se saber o instante de tempo no qual um valor de  $b_m[i]$  foi gerado, multiplica-se  $i$  pelo período de amostragem usado. O índice  $i \in [0, M-1]$ , onde  $M$  deve ser igual ou maior que o maior atraso possível da rede utilizada, dividido por  $T_a$ . Então, para ser definido o valor de  $b_m[i]$  que será atribuído a  $Y_m(s)$ , no momento de sua

leitura, é atribuído ao índice  $i$  o tempo de *roundtrip* dividido por  $T_a$  conforme a expressão (29).

$$Y_m(t) = b_m[i] \quad , \text{ onde } i = \text{int} \left( \frac{\theta_{rt}}{T_a} \right) \quad \text{e } i \in N \quad (29)$$



**Figura 32: Estrutura de dados para o ajuste de atraso de *roundtrip*.**

Utilizando-se este algoritmo para o ajuste do atraso no modelo, ainda que vários sinais de controle sejam gerados em um período de *roundtrip*, o ajuste provê resultados muito próximos do atraso correspondente ao sinal aplicado na planta. Exemplificando, seja o sinal de controle  $C_1$  que gera uma saída  $B_{m1}$  no modelo. O sinal  $B_{m1}$  deve ser comparado ao sinal  $B_1$ , i.e., o sinal B da planta no momento em que foi aplicado o sinal  $C_1$ .

Assim como na maioria das aplicações com restrições de tempo real, que utilizam redes IP, a presente proposta é avaliada sobre uma rede com protocolo de transporte UDP. A escolha baseou-se nas características estudadas em seções anteriores, onde foram feitas comparações entre TCP e UDP. O dispositivo a ser controlado é o modelo de um motor de corrente contínua simulado em um PC.

Duas diferenças podem ser destacadas deste experimento daquele realizado em (WANG; XU; WANG, 2005). Primeiro, enquanto neste o atraso é ajustado a cada novo pacote recebido, extraíndo-se a informação exata do atraso contida no próprio pacote, em (WANG; XU; WANG, 2005) o atraso é ajustado utilizando-se a equação (26). Segundo, aqui não é utilizado o *Network Delay Regulator* (NDR) para eliminar o *jitter*. Em (WANG; XU; WANG, 2005) tratou-se do grande atraso da rede com o Preditor de Smith e o *jitter*, com o NDR. A nova proposta é tratar o atraso de forma exata para cada pacote. Já a característica *self-similar* da rede considerada em (WANG; XU; WANG, 2005), também é tida como pressuposto aqui.

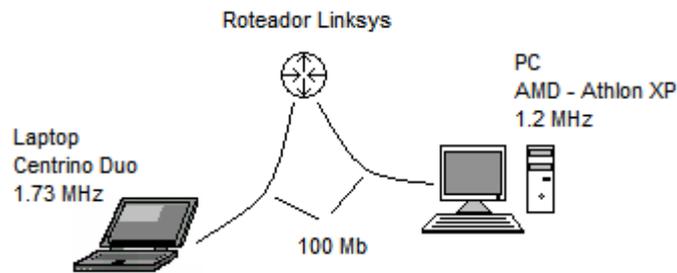
A seguir serão apresentados o *hardware* utilizado, os algoritmos elaborados para representar a planta, o roteador (simula atrasos de rede) e os tipos e controle desenvolvidos. Após a apresentação de cada tipo de controle, serão expostos gráficos com resultados correspondentes e a análise dos mesmos.

#### 4.1 *HARDWARE* UTILIZADO

O *hardware* utilizado foi o seguinte:

- Um *desktop* PC com processador Athlon XP 2000 com 512 MB de memória RAM configurado com *clock* de 1,2 MHz, para o simulador de rede;
- Um *laptop* com processador Centrino Duo de 1,7 GHz com 1 GB de memória RAM para o controlador e a planta;
- Um roteador Linksys modelo WRT54GC;
- Conexões com taxa de 100 Mbps.

A Figura 33 mostra a conexão dos equipamentos utilizados.

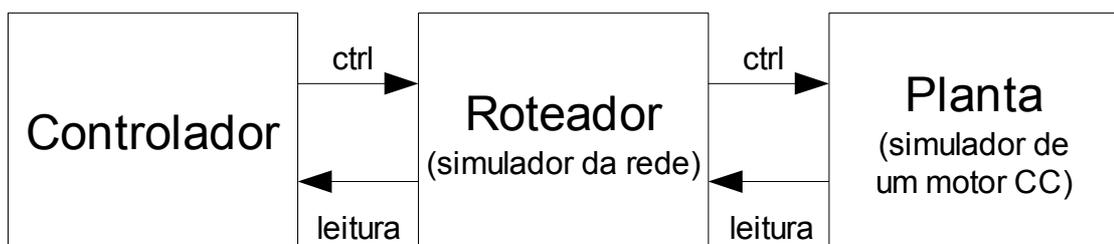


**Figura 33: Configuração da bancada de ensaios.**

## 4.2 ARQUITETURA DO EXPERIMENTO

Para se fazer uma análise da resposta ao controle em malha fechada, com características previamente citadas de redes IP no caminho desta malha, serão usados três módulos de *software*: um para o controlador, outro para a planta e o terceiro para simular um roteador IP, todos com tarefas que devem atender a requisitos de tempo real. Para atender a tais requisitos, foi feito uso do sistema operacional linux, alterando seu kernel com o RTAI (RTAI, 2006).

Cada módulo de *software* poderia ser executado em uma máquina diferente, mas optou-se por executar os *softwares* da planta e do controlador em um PC e o roteador em outro. O fato da planta e do controlador estarem no mesmo equipamento, permitiu não haver preocupação com o sincronismo de relógios, pois os dois processos usaram o mesmo relógio. A interface entre estes módulos pode ser vista na Figura 34.

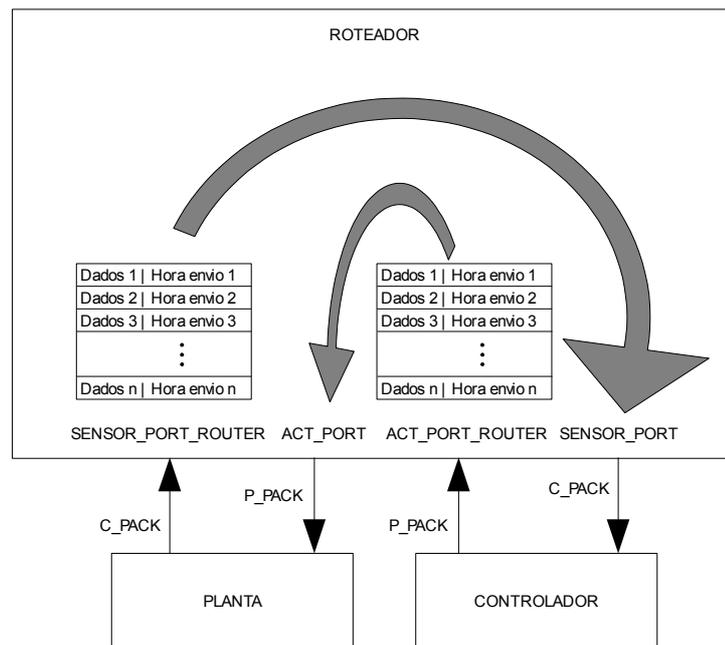


**Figura 34: Relação entre os módulos de *software* do experimento.**

#### 4.2.1 ROTEADOR

O programa que simula o roteador foi elaborado para transmitir pacotes entre a planta e o controlador. Neste podem ser inseridos atrasos para simular o tráfego e as filas de um roteador real.

Como pode ser visto na Figura 35, o algoritmo do *software* deste simulador contém filas independentes para cada porta de entrada. Também cada fila tem uma porta de saída correspondente. A estrutura de informações de cada posição de uma fila é composta do próprio pacote de dados recebido (em formato ASCII) e da hora em que esse deve ser enviado.



**Figura 35: Posição do simulador de rede (roteador) no experimento.**

Quando um pacote chega a uma porta de entrada, o algoritmo verifica a hora atual e soma o atraso programado, guardando o resultado como a hora em que o pacote deverá ser enviado. O atraso programado varia de acordo com uma função de geração de números

pseudo-aleatórios, com distribuição uniforme, somado a uma constante ou um valor com crescimento linear, proporcional ao tempo em que o experimento estiver rodando.

A verificação da chegada de novos pacotes, de forma não bloqueante, é feita periodicamente a cada 5 ms. Neste instante também é feita a verificação se há algum pacote que deve ser enviado, i.e., se algum pacote já expirou o seu tempo na fila. Para garantir a periodicidade, foram utilizados os recursos de módulos do RTAI (RTAI, 2006).

#### 4.2.2 PLANTA (MOTOR)

Um motor de corrente contínua foi escolhido como objeto a ser controlado. Na tabela abaixo encontram-se as especificações do motor, obtido em (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1975), na página 451.

**Tabela 2: Especificações do motor de corrente contínua a ser controlado.**

| MOTOR CC                       |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Potência                       | 1 HP, 746 watts                    |
| Tensão de Campo                | 240 V                              |
| Velocidade de operação         | 500 rpm, 52,3 rad/s                |
| Resistência de Armadura        | $R_a = 7,56 \Omega$                |
| Indutância de Armadura         | $L_a = 0,055 \text{ H}$            |
| Coefficiente de Atrito Viscoso | $B = 0,269 \text{ N.m.s/rad}$      |
| Momento de Inércia do Rotor    | $J = 0,068 \text{ kg.m}^2$         |
| $K_a$ e $K_m$                  | $K_a = K_m = 4,23 \text{ V.s/rad}$ |

Em (FAGUNDES, 1989), o motor é representado pela equação diferencial transcrita na expressão (30).

$$\frac{L_a J}{K_a} \frac{d^2}{dt^2} \omega + \frac{R_a J + L_a B}{K_a} \frac{d}{dt} \omega + \left( \frac{R_a B}{K_a} + K_m \right) \omega = e_a \quad (30)$$

A expressão (30) pode ser reescrita para a expressão (31).

$$\frac{d^2}{dt^2}\omega + \frac{R_a J + L_a B}{L_a J} \frac{d}{dt}\omega + \left(\frac{R_a B}{L_a J} + \frac{K_m K_a}{L_a J}\right)\omega = \frac{K_a}{L_a J} e_a \quad (31)$$

A variável  $\omega$  representa a velocidade angular do eixo do motor e  $e_a$  a tensão aplicada sobre a armadura do motor. Seja então  $\omega$  a saída  $y(t)$  do sistema e  $e_a$  a entrada  $u(t)$ .

$$u(t) = e_a \quad (32)$$

$$y(t) = \omega \quad (33)$$

Para a representação por variáveis de estado na forma matricial, em (FAGUNDES, 1989), pág. 75, montam-se as equações (34), (35) e (36).

$$a_1 = \frac{R_a \cdot J + L_a \cdot B}{L_a \cdot J} \quad (34)$$

$$a_2 = \frac{R_a \cdot B}{L_a \cdot J} + \frac{K_m \cdot K_a}{L_a \cdot J} \quad (35)$$

$$b_0 = \frac{K_a}{L_a \cdot J} \quad (36)$$

Então, a expressão (31) pode ser representada de forma equivalente pela expressão (37).

$$\ddot{y}(t) + a_1 \cdot \dot{y}(t) + a_2 \cdot y(t) = b_0 \cdot u(t) \quad (37)$$

Sejam as variáveis de estado  $x_1$  e  $x_2$  representadas pelas equações (38) e (39).

$$x_1 = \frac{y}{b_0} \quad (38)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 = \frac{\dot{y}}{b_0} \quad (39)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\ddot{y}}{b_0} \quad (40)$$

$$\ddot{y}(t) = -a_2 y(t) - a_1 \dot{y}(t) + b_0 u \quad (41)$$

$$\frac{\ddot{y}(t)}{b_0} = -a_2 \frac{y(t)}{b_0} - a_1 \frac{\dot{y}(t)}{b_0} + \frac{b_0 u}{b_0} \quad (42)$$

$$\dot{x}_2 = -a_2 x_1 - a_1 x_2 + u \quad (43)$$

O sistema de equações de estado é formado pelas (38), (39) e (43). Este pode ser representado também na forma matricial das expressões (44) e (45).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (44)$$

$$y = \begin{bmatrix} b_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Tomando-se os parâmetros do motor na Tabela 2 e aplicando-os nas equações (34), (35) e (36), resultam as igualdades das equações (46), (47) e (48).

$$a1 = 141,41043 \quad (46)$$

$$a2 = 5327,9519 \quad (47)$$

$$b0 = 1131,016 \quad (48)$$

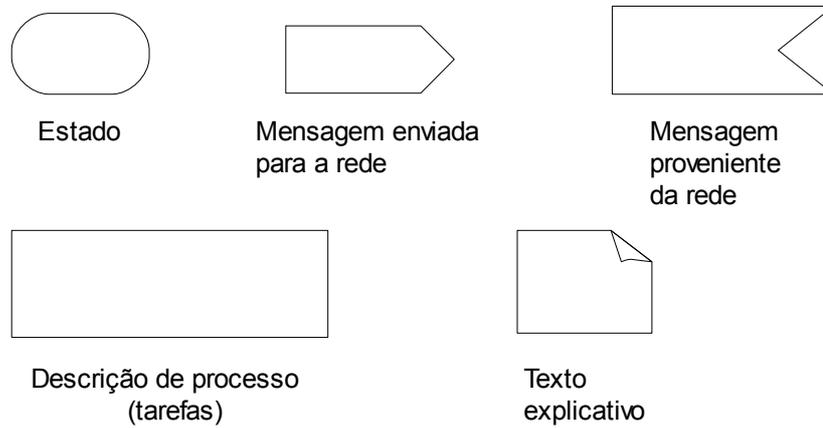
Desta forma, obteve-se uma matriz que representa um espaço de estados. A partir desta o comportamento da saída do motor CC da Tabela 2 pode ser simulado em função de entradas de referência.

Os autovalores, que representam o comportamento do motor em laço aberto são:  
 $-70.705214 + j18.130764$  e  $-70.705214 - j18.130764$ .

#### 4.2.2.1 ESTRUTURA DE *SOFTWARE* DA PLANTA (MOTOR)

O *software* para simular o motor foi desenvolvido com o intuito de representá-lo da maneira mais fidedigna possível. Para isso é feita periodicamente a verificação de chegada de um novo sinal de controle por uma *thread* exclusiva para este fim. Outra *thread* é criada para calcular de forma periódica o valor dos sensores, a partir do estado do modelo e do último valor de controle recebido. Após o cálculo, o valor resultante é enviado juntamente com o tempo de atraso que o sinal de controle teve do controlador para a planta e com a hora da

saída deste pacote de dados. O algoritmo desse *software* está descrito de forma simplificada na representação gráfica denominada *Specification and Description Language* (SDL), na Figura 37.



**Figura 36: Significado das formas usadas em SDL.**

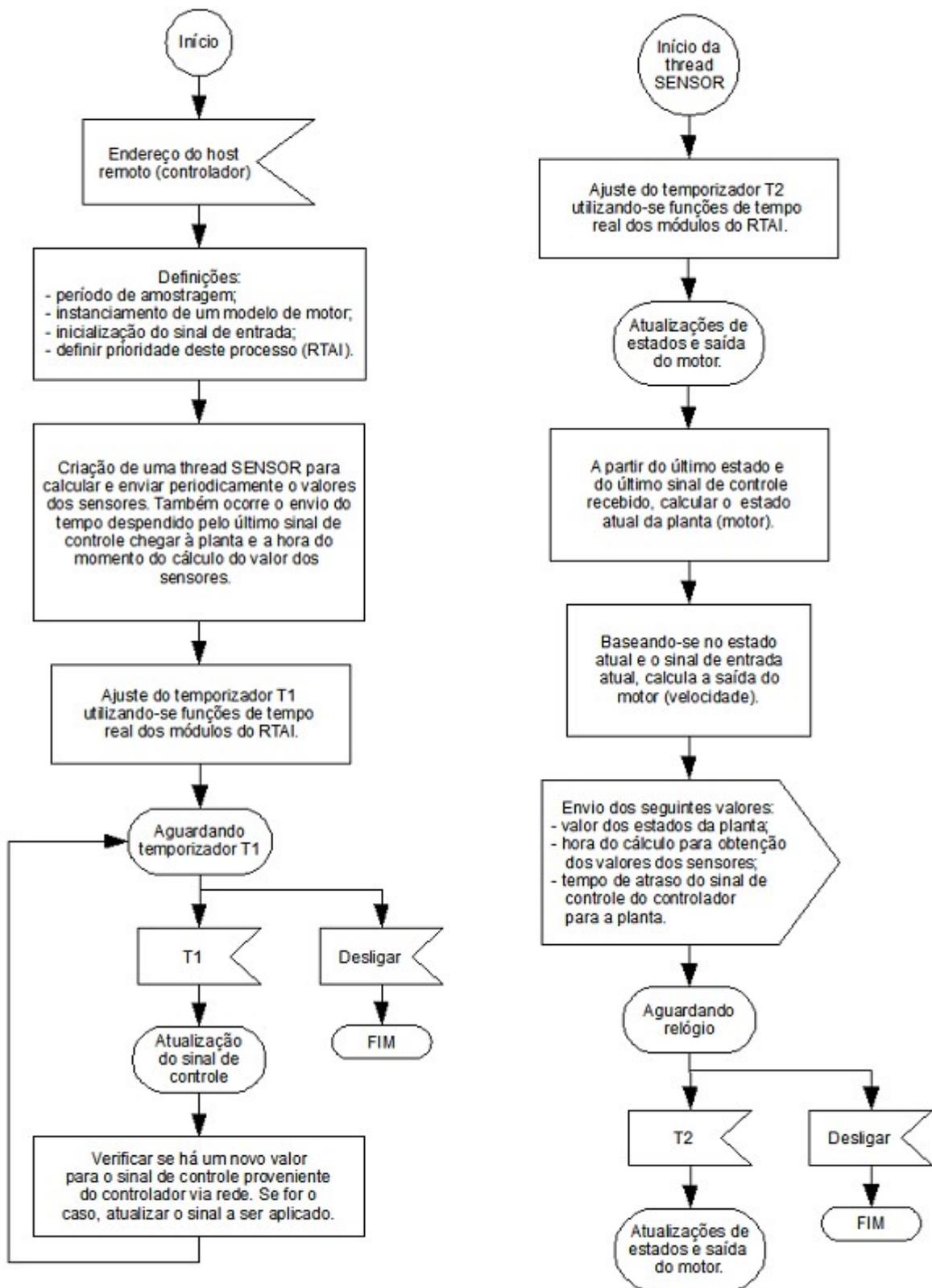
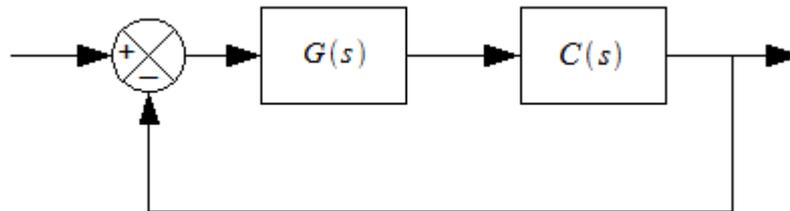


Figura 37: Estrutura do simulador da planta em SDL.

### 4.2.3 CONTROLADOR

Seja o motor CC, representado por (44) e (45), sendo  $G(s)$  sua função de transferência, controlado por  $C(s)$  em laço fechado, conforme a Figura 38.



**Figura 38: Sistema em malha fechada.**

Então, a função de transferência deste sistema está representado em (49).

$$T(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (49)$$

Para que o sistema siga uma referência do tipo degrau, sem erro em regime permanente, i.e., seja do tipo 1 (1 pólo na origem), foi escolhido um controlador representado pela equação (50). Ele apresenta um zero sobre o eixo real no semi-plano esquerdo ( $a < 0$ ) e um pólo na origem.

$$C(s) = K \frac{s+a}{s} \quad (50)$$

Segundo (HEMERLY, 2000), página 81, usando-se a transformação bilinear (transformação de Tustin) representada pela equação (51), se o sistema for estável no plano  $s$ , também será no plano  $z$ . Faz-se então a transformação de  $C(s)$  para  $C(z)$ , sendo  $T_a$  o período de amostragem.

$$s = \frac{2}{T_a} \frac{z-1}{z+1} \quad (51)$$

$$C(z) = K \frac{\frac{2}{T_a} \frac{z-1}{z+1} + a}{\frac{2}{T_a} \frac{z-1}{z+1}} = K \frac{2(z-1) + a T_a (z+1)}{2(z-1)} \quad (52)$$

Simplificando:

$$C(z) = K \frac{(B+1)z + (B-1)}{z-1} = K \frac{(B+1) + (B-1)z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (53)$$

onde

$$B = \frac{a T_a}{2}. \quad (54)$$

Como

$$U(z) = E(z) C(z) \quad (55)$$

$$U(z) = K \frac{(B+1) + (B-1)z^{-1}}{1-z^{-1}} E(z) \quad (56)$$

$$U(z) = U(z) z^{-1} + K ((B+1) E(z) + (B-1) E(z) z^{-1}) \quad (57)$$

$$u(k) = u(k-1) + K ((B+1) e(k) + (B-1) e(k-1)) \quad (58)$$

**Tabela 3: Valores de  $B$  dados  $a$  e  $T_a$**

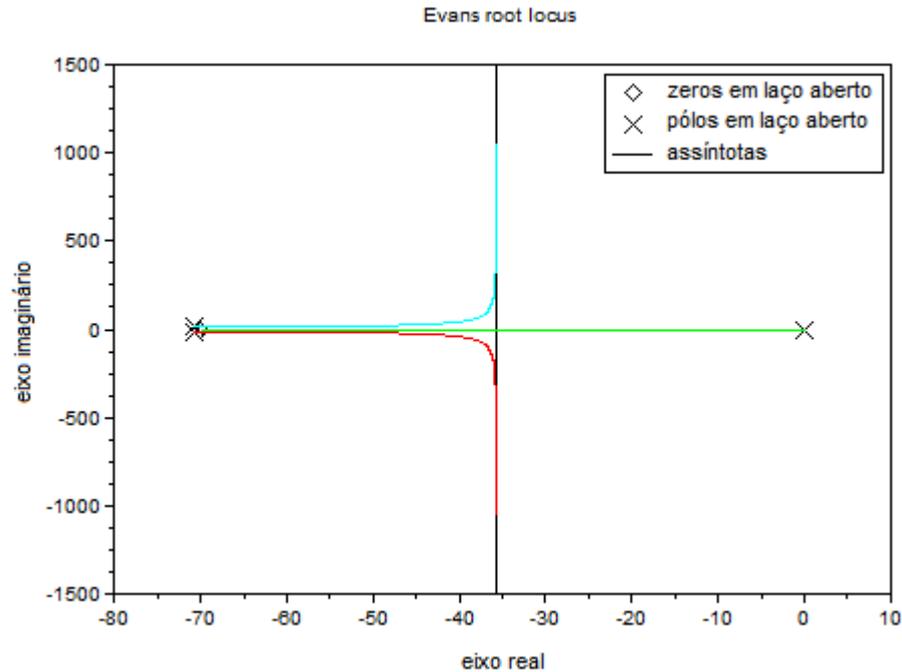
| $a / T_a$ | 10 ms | 20 ms |
|-----------|-------|-------|
| 10        | 0,05  | 0,10  |
| 50        | 0,25  | 0,5   |
| 70        | 0,35  | 0,7   |

Seja  $a=70$ , então:

$$C(s) = K \frac{s+70}{s} \quad (59)$$

O *root locus* de  $T(s)$  em função do ganho  $K$ , foi obtido utilizando-se o *software* matemático Scilab e está representado na Figura 39. Analisando-se o do lugar das raízes, conclui-se que o sistema é estável para qualquer valor de  $K$  maior que 0, o que deve ser

levado em conta então, são os requisitos de tempo de resposta e máximo sobrepasso na saída do sistema em relação a variações na entrada do mesmo.



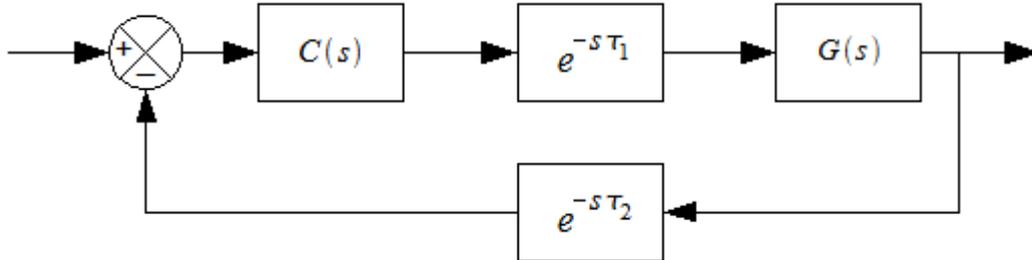
**Figura 39:** Caminho dos pólos em laço fechado no plano complexo, variando-se  $K$  no intervalo  $(0, \infty)$ .

**Tabela 4:** Lugar das raízes em função do ganho  $K$ .

| $K$ | Pólos                            |
|-----|----------------------------------|
| 0   | 0 e $-70,7 \pm j18,130$          |
| 1   | $-19,30$ e $-61,056 \pm j19,353$ |
| 2   | $-56,97$ e $-42,221 \pm j31,572$ |
| 5   | $-65,90$ e $-37,755 \pm j67,680$ |
| 6   | $-66,61$ e $-37,401 \pm j75,714$ |

Agora introduzindo-se um atraso no caminho do sinal de controle até a planta e também no caminho de realimentação, representados na Figura 40, surge a nova função de

transferência  $T(s)$  da expressão (60). Para simplificar a análise, serão considerados iguais os atrasos  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , sendo ambos representados por  $\tau$ .



**Figura 40: Sistema em malha fechada com atraso  $\tau$  nos dois sentidos da malha de controle.**

$$T(s) = \frac{e^{-\tau s} C(s) G(s)}{1 + e^{-2\tau s} C(s) G(s)} \quad (60)$$

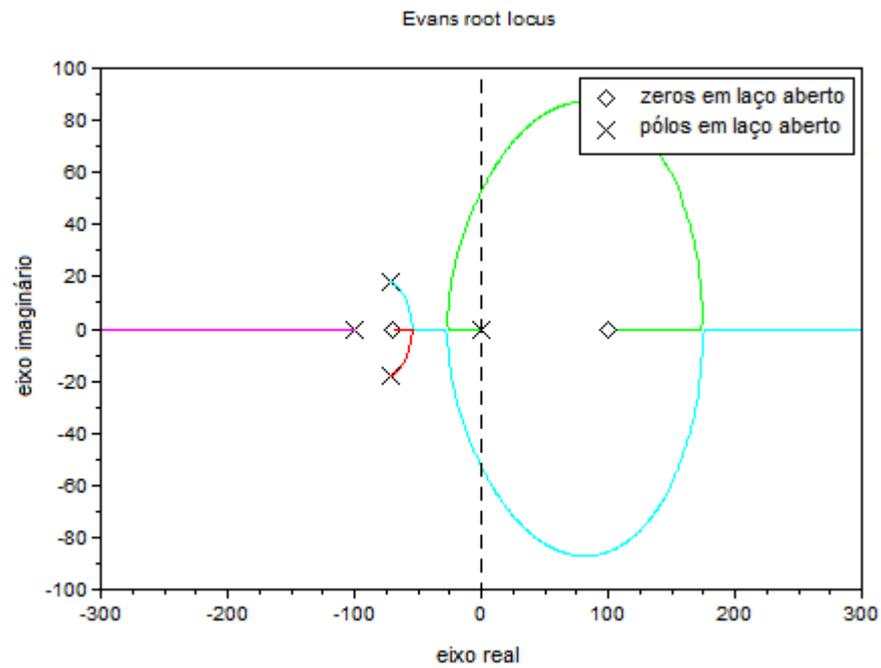
Para ser simulada a  $T(s)$  no *software* matemático Scilab, será usada a aproximação de Padé de primeira ordem, conforme a equação (61).

$$e^{-\tau s}(s) = \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} = -\frac{s - 2/\tau}{s + 2/\tau} \quad (61)$$

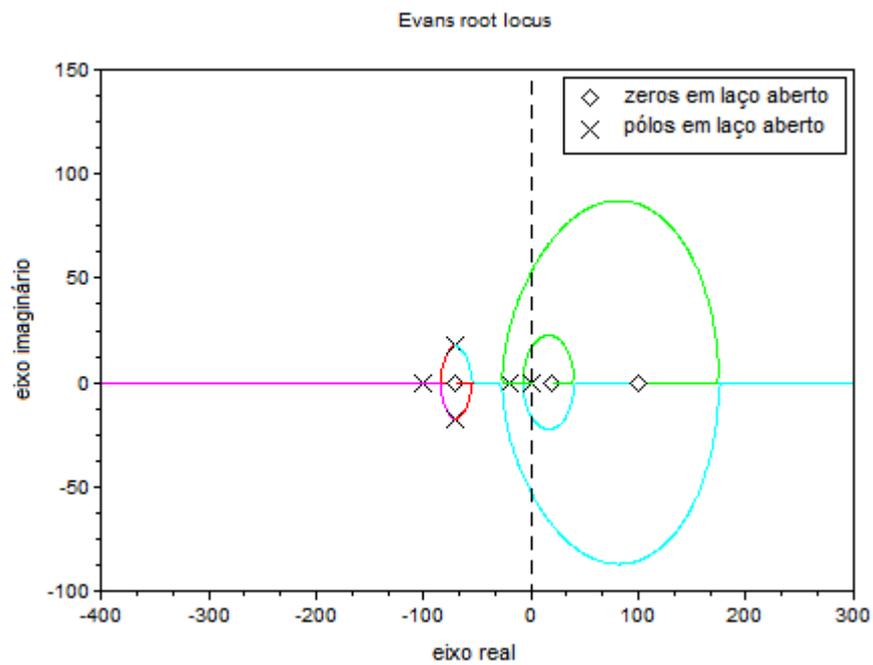
Para  $\tau$  igual a 10 ms e 50 ms seguem os gráficos do lugar das raízes respectivamente representados pelas Figura 41 e Figura 42.

Comparando-se o *root locus* da Figura 39 com os das Figura 41 e Figura 42, percebe-se que sem os atrasos, o sistema é sempre estável, enquanto que com os atrasos de transmissão na rede, este torna-se instável a partir de certo ganho.

Utilizando-se o controlador  $C(s)$ , com ganho  $K=0,5$  e simulando-se a resposta ao degrau unitário (1 rad/s) no *software* matemático Scilab, obtém-se a curva de resposta da Figura 43. Neste caso foi desconsiderada a rotação nominal do motor, 52,3 rad/s, considerando-se que o mesmo tenha comportamento linear, sem prejudicar o objetivo desta análise. Acrescentando-se atrasos na malha, foram geradas as curvas da Figura 44.



**Figura 41: O root locus de  $T(s)$  quando os atrasos forem de 10 ms.**



**Figura 42: O root locus de  $T(s)$  quando o atraso for de 50 ms.**

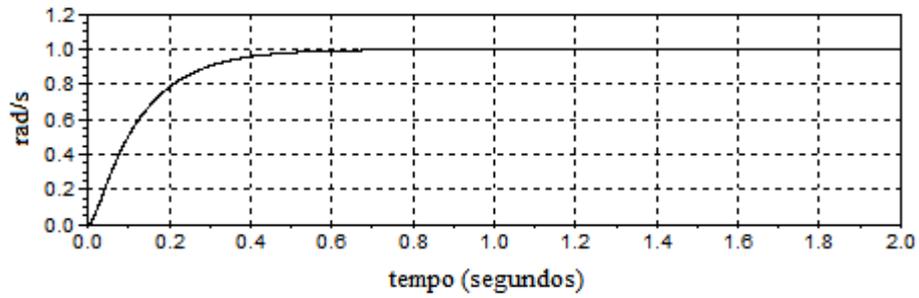


Figura 43: Curva de erro e resposta do sistema sem inserção de atrasos, simulando-se com o Scilab.

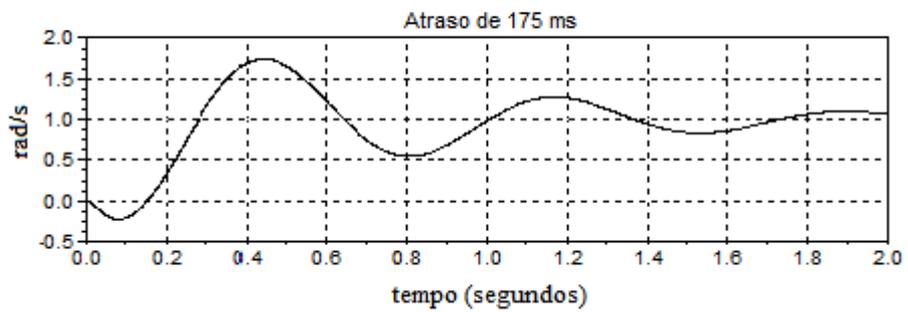
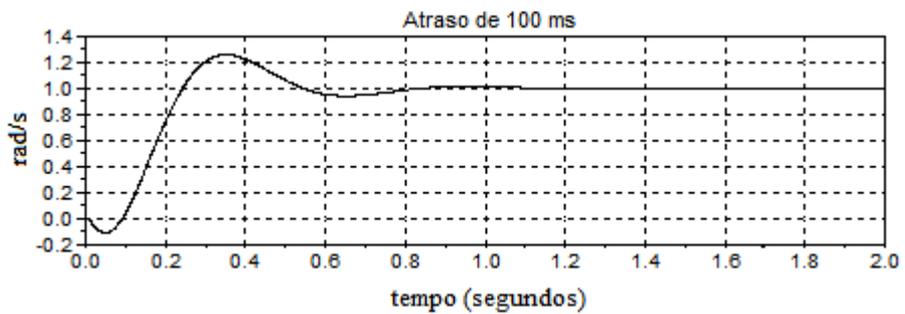
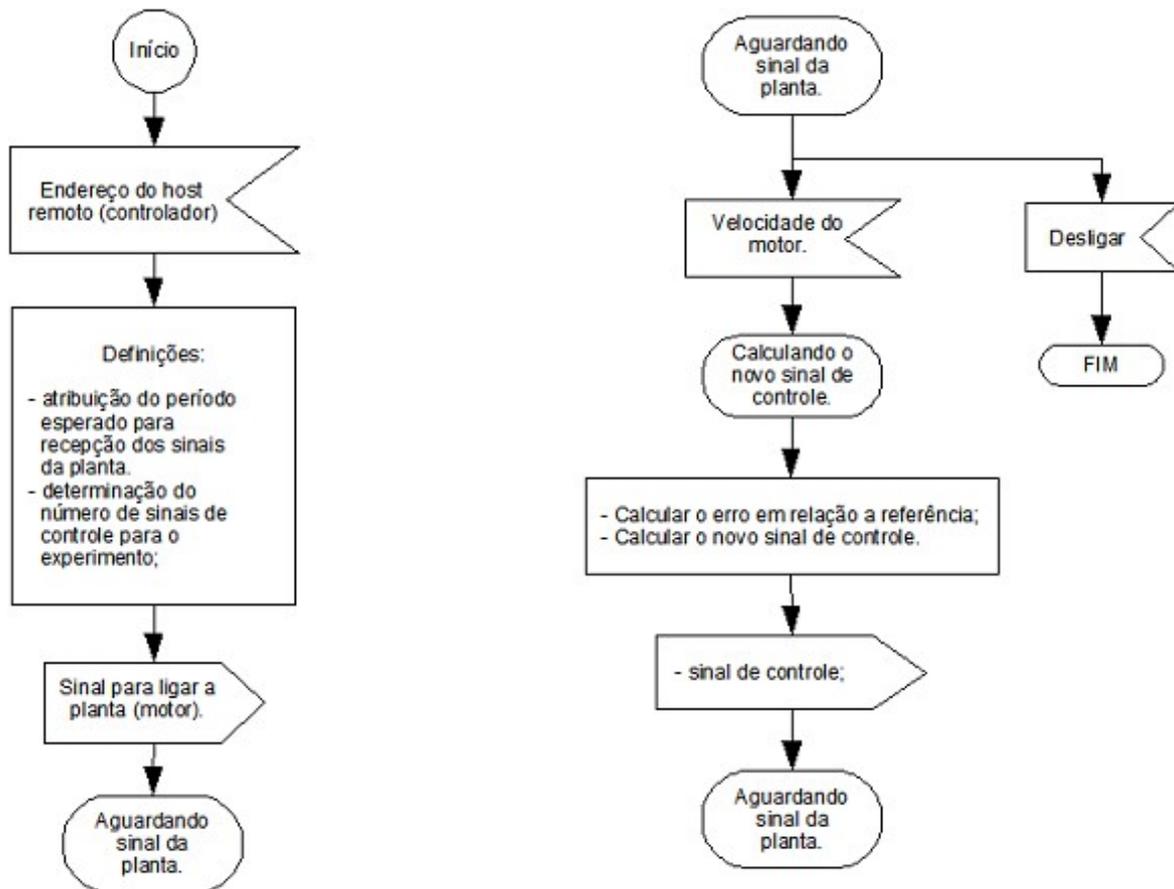


Figura 44: Resposta ao degrau do sistema considerando diferentes valores para o atraso.

O próximo passo é implementar o controle  $C(z)$  proposto em (53), considerando  $a=70$  e  $T_a=10\text{ms}$  em linguagem C++. O período de amostragem  $T_a$  foi escolhido, segundo critérios de análise da Seção 2.1.2. Serão acrescentadas compensações para os atrasos da rede e avaliados os resultados. A seguir serão apresentadas as formas de compensação desenvolvidas, descritas em *Specification and Description Language* (SDL). Primeiro será descrito o algoritmo que simplesmente implementa o compensador representado por (59) como se o controle fosse local, i.e., desconsiderando-se os atrasos da rede IP. Na subseção seguinte, será descrito o compensador baseado na solução de compensação de atrasos abordada em (ALT, 2003). Na seqüência, o mesmo se faz para uma solução baseada no Preditor de Smith mas também com o artifício de ajuste do compensador ao *jitter* do atraso de rede a cada pacote de informações, similar ao feito em (ALT, 2003). Esta última solução ajusta o atraso no modelo da planta de acordo com as variações do atraso da rede assim como em (WANG; XU; WANG, 2005).

#### 4.2.3.1 CONTROLADOR SEM COMPENSAÇÃO PARA O ATRASO

Este primeiro tipo de controle foi abordado apenas para servir como base de comparação e verificar a eficiência das soluções seguintes. Neste caso, o controlador envia o primeiro comando para a planta ser acionada, então fica aguardando o retorno de pacotes com o valor do sinal do sensor junto a planta. Neste estudo de caso, trata-se da velocidade do motor sendo simulado. O período entre cada novo cálculo e envio do sinal de controle depende da chegada de um novo sinal do sensor. O descrição em SDL na Figura 45 representa o algoritmo deste controlador.



**Figura 45: Algoritmo do controlador sem compensação para o atraso na rede.**

O comportamento na saída do sistema neste ensaio, conforme Figura 46, mostra-se similar ao que se esperava a partir das simulações feitas com o Scilab (Figura 44). Vale salientar que existem algumas diferenças, na simulação com o Scilab, o atraso foi aproximado usando-se a aproximação de Padé. Também, o atraso naquele caso era constante, enquanto neste ensaio o atraso é variante, como mostrado na Figura 47.

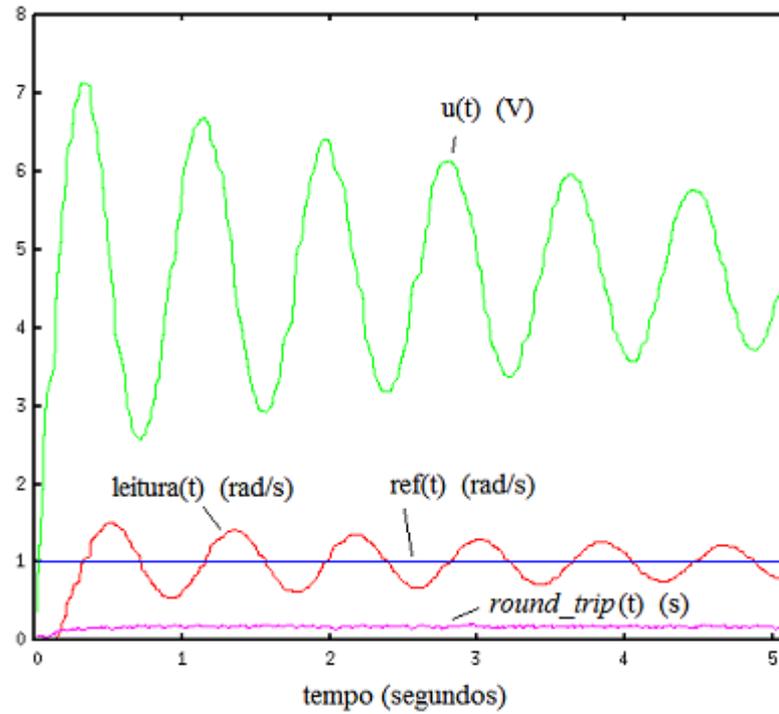


Figura 46: Resultado do controle sem compensação de atrasos.

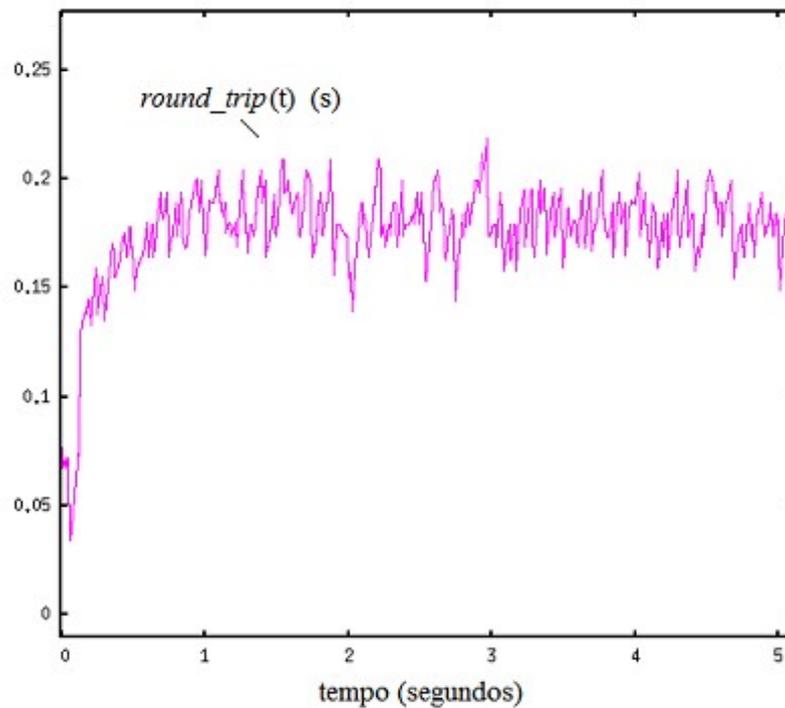
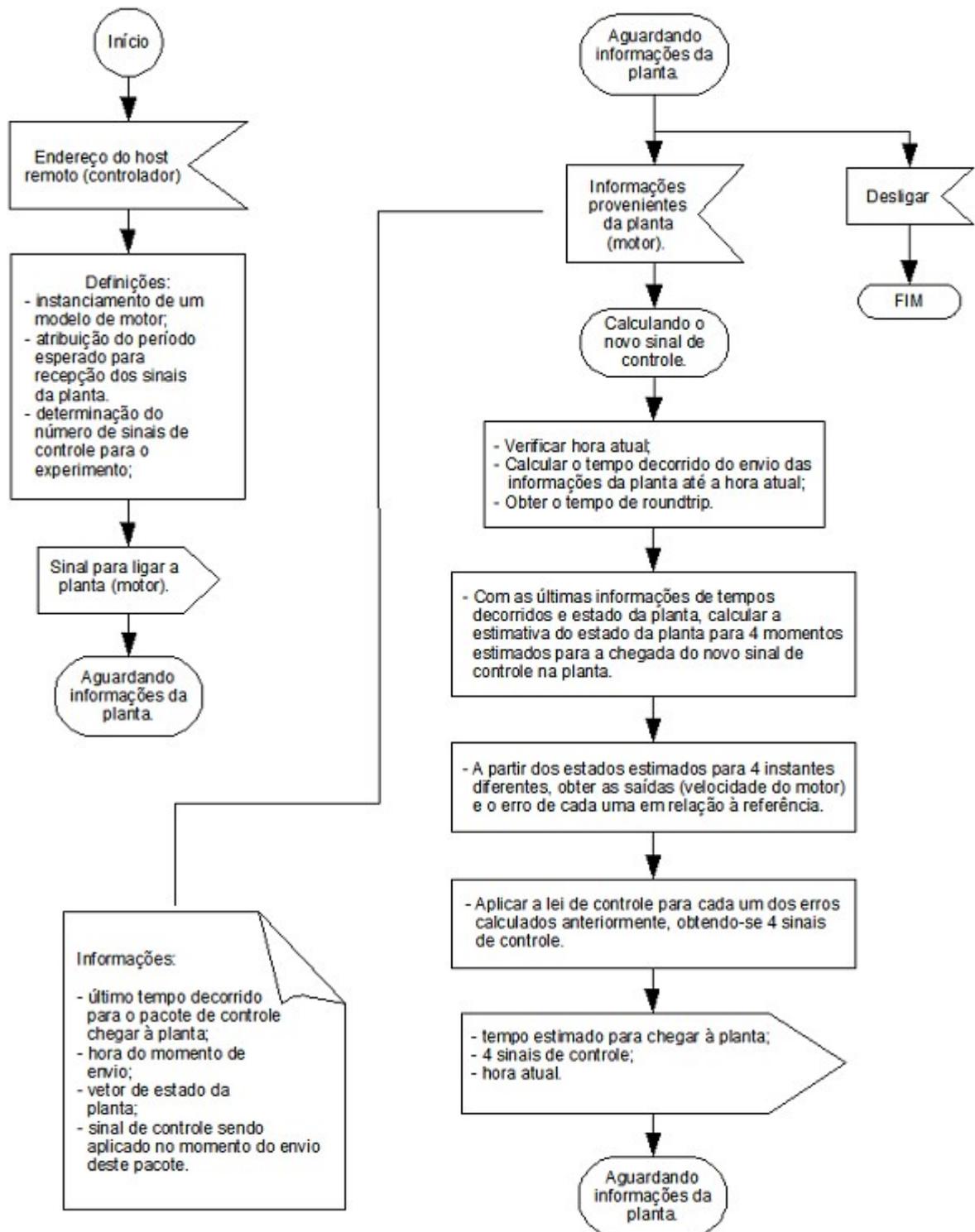


Figura 47: Destaque da curva do *roundtrip* (s) em relação ao tempo (ms).

## 4.2.3.2 SOLUÇÃO SIMILAR A DE (ALT, 2003)

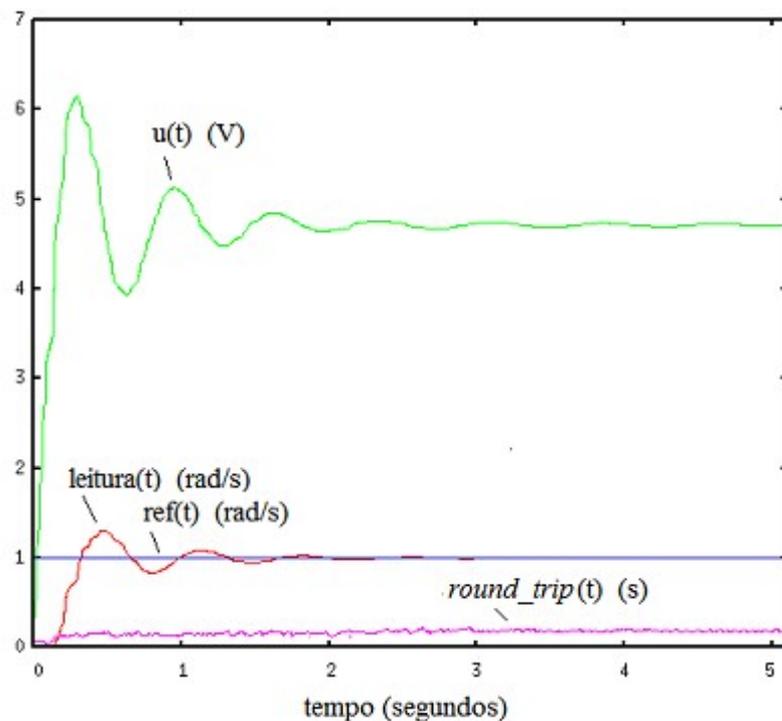


**Figura 48: Estrutura simplificada em SDL do algoritmo de controle baseado na solução apresentada em (ALT, 2003).**

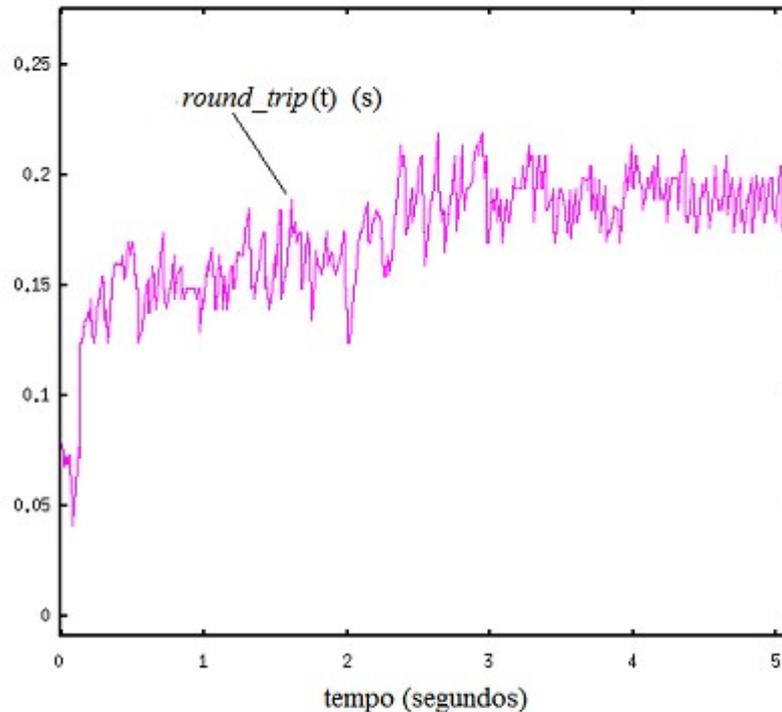
O diagrama SDL da Figura 48 expõe o algoritmo da primeira solução abordada neste trabalho para compensar os atrasos da rede IP. Este baseia-se na solução implementada em

(ALT, 2003), onde os atrasos da planta para o controlador são compensados estimando-se o estado da planta após decorrido tal atraso. A compensação do atraso do controle para a planta é feito estimando-se o próprio atraso a partir de um histórico e então se fazem  $n$  estimativas dos estado da planta quando esta receber o pacote com  $n$  sinais de controle. O número  $n$  de estimativas e sinais de controle depende da incerteza da estimativa de atraso.

Verifica-se na Figura 49 que a aplicação deste tipo de compensação resulta em uma melhora significativa no desempenho do controle, como já havia sido demonstrado em (ALT, 2003). Comparando-se a com a curva de resposta da Figura 46, o sobrepasso foi reduzido de 51% para 30%. O tempo de acomodação, considerando-se a faixa de 5% em torno do valor de regime permanente, foi reduzido de mais de 5000 ms para 1364 ms.



**Figura 49:** Controle com princípios de compensação de atrasos similar ao utilizado em (ALT, 2003), para *roundtrip* variando entre 125 ms e 222 ms.



**Figura 50: Destaque da curva de  $roundtrip$  (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.**

Para se verificar o limite de estabilidade deste sistema em função do atraso de transporte, foi imposto um atraso crescente de incremento constante na rede. A compensação do atraso ocorreu conforme a abordagem proposta por Alt (2003) que foi descrita na Seção 4.2.1, destinada à descrição da simulação de um roteador. O resultado na resposta do sistema em relação a este incremento no atraso é visto na Figura 51.

A curva da Figura 51 apresenta de forma clara que inicialmente a curva de resposta tende a convergir para a referência, mas a partir de um instante do intervalo entre 1000 e 2000 ms, o atraso chega ao nível que leva o sistema à instabilidade. Isto significa que para uso deste tipo de solução para atrasos que levam o sistema para sua zona de instabilidade, seria necessária a redução do ganho, o que também afetaria o desempenho obtido.

Na Seção seguinte será abordada outra solução, que como esta, procura adequar cada novo sinal de controle com a variação do atraso, mas também utiliza-se do Preditor de Smith.

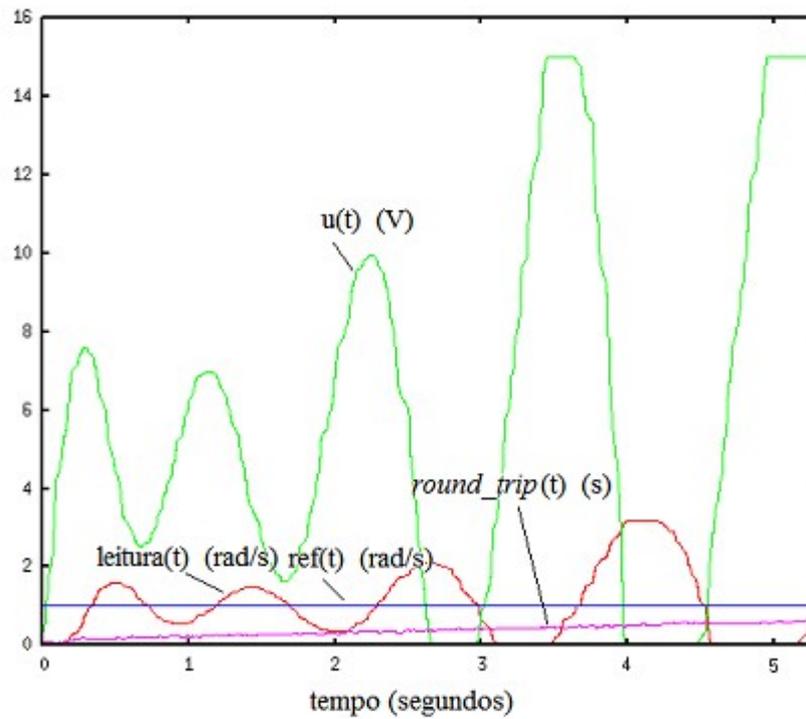


Figura 51: Controle com princípios de compensação de atrasos similar ao utilizado em (ALT, 2003), para *roundtrip* crescente e com *jitter*.

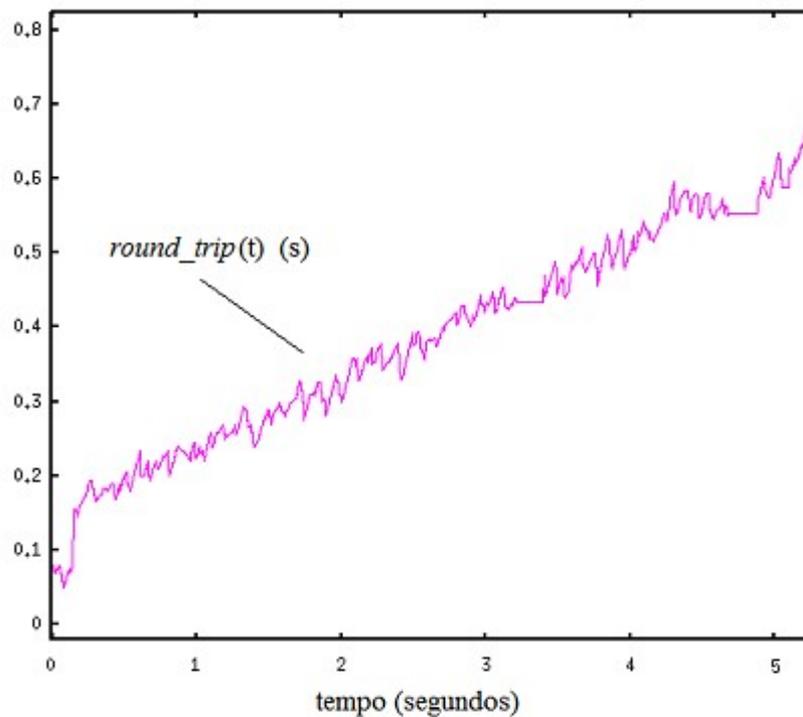
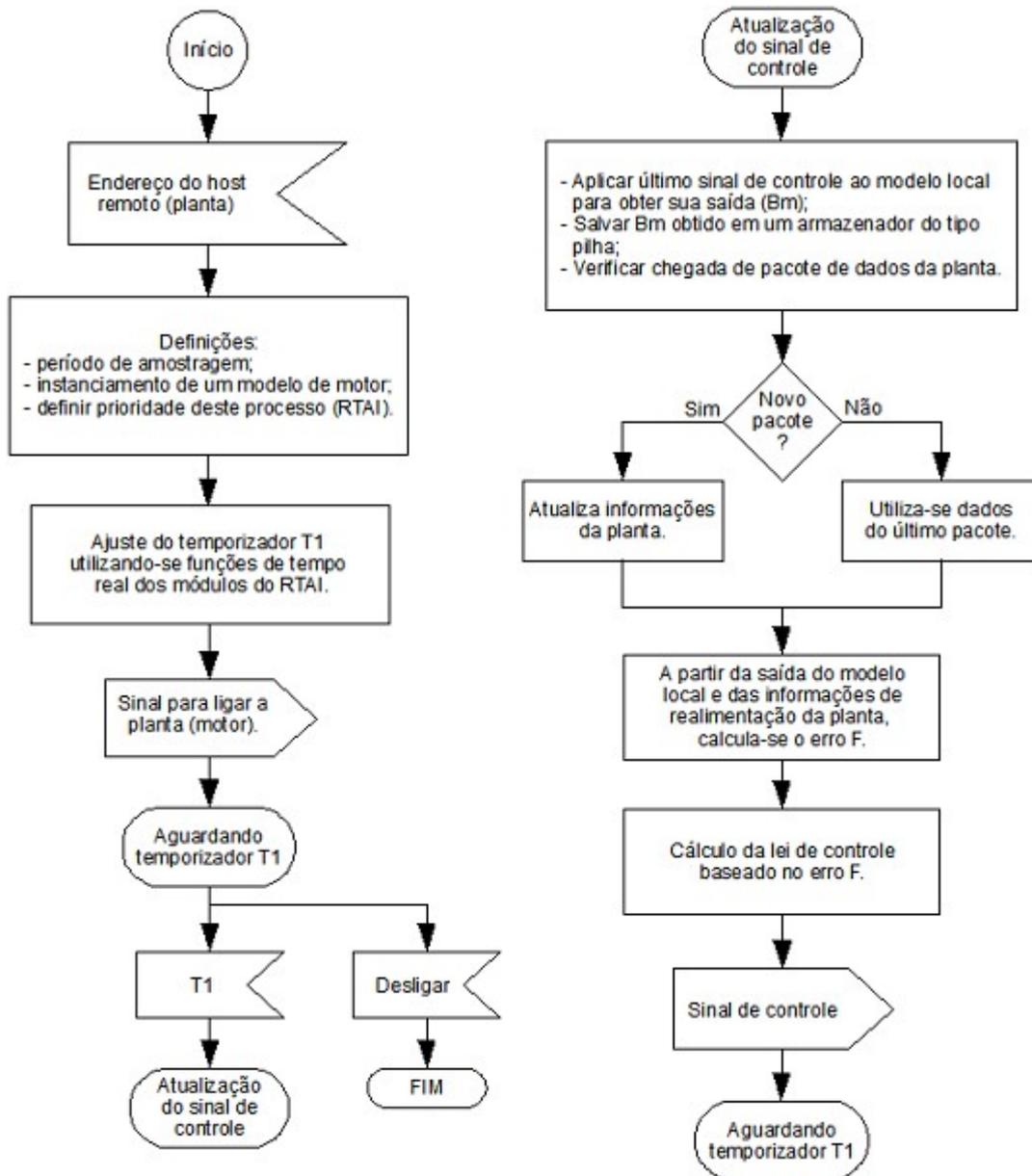


Figura 52: Destaque da curva de *roundtrip* (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.

#### 4.2.3.3 SOLUÇÃO PROPOSTA COM O PREDITOR DE SMITH E AJUSTE PARA ATRASO VARIANTE

Para implementar um algoritmo baseado no Preditor de Smith, foi gerado um *software* que contém uma estrutura de dados para armazenar os valores de  $B_m$  a cada instante em que é gerado um novo sinal de controle, onde  $B_m$  é a saída do modelo local da planta ( $G_m(s)$ ). Um novo valor é posto na estrutura a cada 10 ms e serve para simular o atraso correspondente a  $T_p(s)$  da Figura 11. Para se obter  $Y_m(s)$ , saída com atraso do modelo, verifica-se o último tempo de *roundtrip*, divide-se este pelo período de aplicação do sinal de controle extraindo-se desta forma o índice do valor armazenado na estrutura. O índice aponta para o valor de  $Y_m(s)$  naquele instante. Com este algoritmo, o atraso simulado no modelo está sempre sendo atualizado. O tamanho da estrutura de dados,  $(M+1)$ , é escolhido levando-se em conta o máximo atraso esperado e o período em que é calculado o sinal de controle. Este atraso pode ser calculado conforme em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004) ou estimado com o grau de segurança desejado, caso a rede não contenha apenas *switchs* em suas conexões. As Figura 29 e Figura 32 ilustram o funcionamento desta malha de controle.

Na Figura 53 encontra-se a representação do algoritmo deste controle em SDL, que se propõe a apresentar seus aspectos mais relevantes.



**Figura 53: Algoritmo simplificado de controle em SDL usando-se o Preditor de Smith com ajuste de atraso.**

Os gráficos das Figura 54 e Figura 55 mostram o desempenho do controle com um atraso médio constante mas com *jitter*. Observa-se um bom desempenho deste controle, comparado com a versão da Seção anterior. O sobrepasso passou de 30% para 1,5% e o tempo de acomodação, considerando-se a faixa de 5% em torno do valor de regime permanente, foi

reduzido de mais de 1364 ms para 435 ms. Na Figura 54 podem ser vistas no mesmo gráfico em função do tempo as seguintes curvas:

- referência em radianos por segundo: é o valor desejado para a saída da planta;
- leitura local em radianos por segundo: é a leitura do modelo local da planta que usado pelo preditor de Smith;
- leitura em radianos por segundo: trata-se do valor de realimentação proveniente da planta e recebido pelo controle.
- sinal de controle  $u$  em Volts: é o valor do sinal de controle enviado
- *roundtrip* em segundos: é o tempo que o sinal de realimentação levou para chegar da planta ao controle, somado ao tempo que o sinal de controle aplicado no instante da leitura do sensor levou para chegar do controle à planta.

Verifica-se que a trajetória das curvas de leitura da saída da planta e de leitura da saída do modelo são similares, porém diferem por um deslocamento no tempo. Este deslocamento é igual ao *roundtrip*. Ainda, pode ser constatado que a curva da saída da planta na Figura 54, está com atraso em relação ao instante em que os valores foram obtidos junto a planta. Isso se deve ao tempo de atraso da planta para o controle, onde a curva é impressa. Portanto, o atraso entre a saída do modelo e a saída da planta é menor do que o que foi representado neste gráfico.

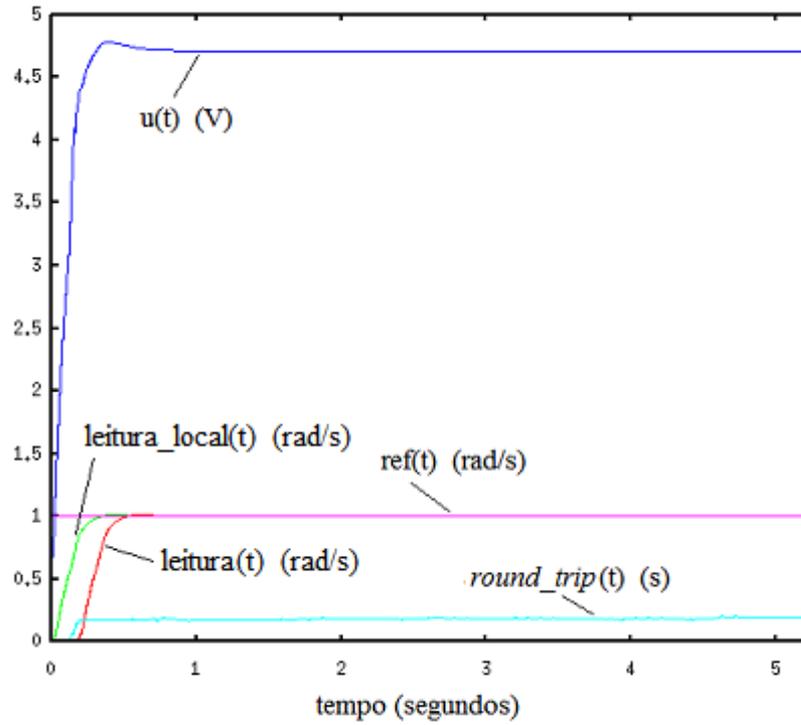


Figura 54: Controle com Preditor de Smith e ajustes de atrasos para *roundtrip* variando entre 149 ms e 206 ms.

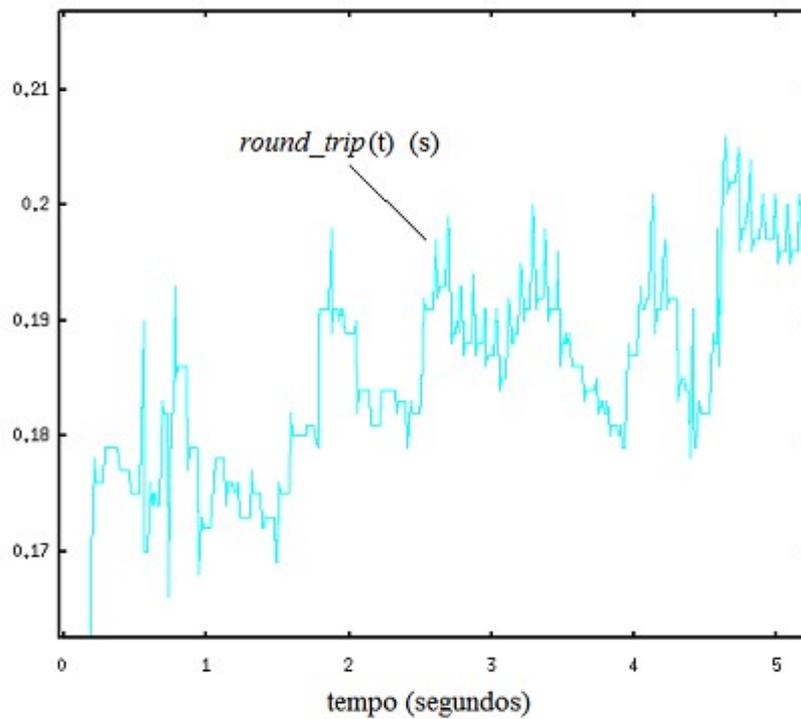
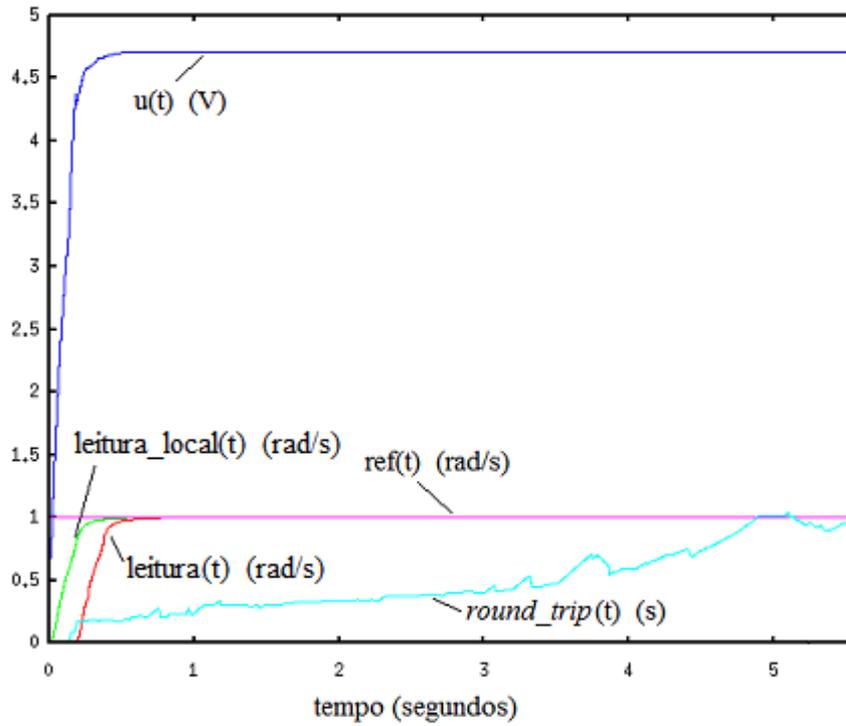
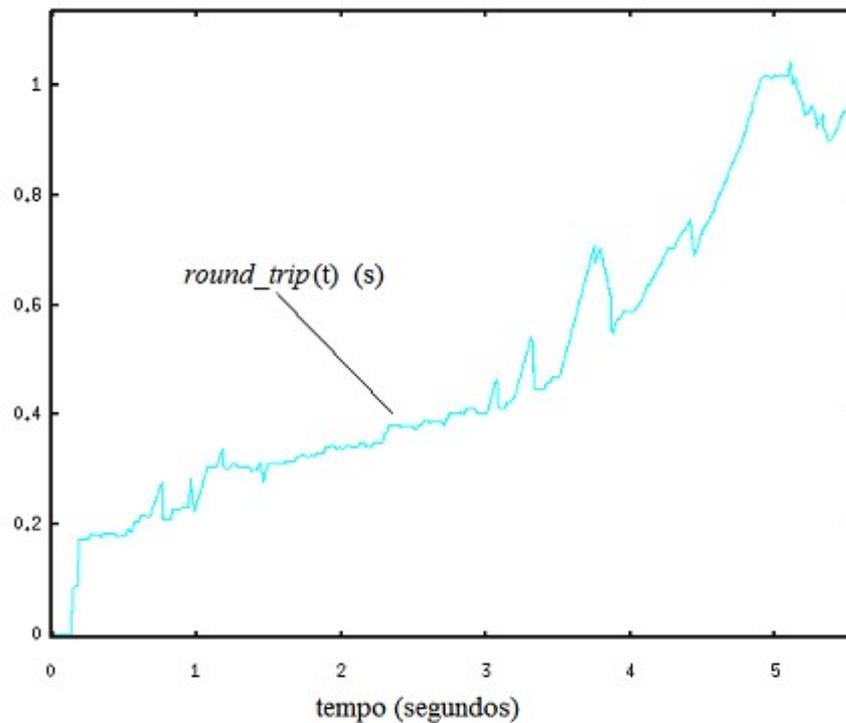


Figura 55: Destaque da curva de *roundtrip* (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.

O resultado obtido e representado nas Figura 56 e Figura 57 foi com uma variação constante do atraso de rede somado ao *jitter*.



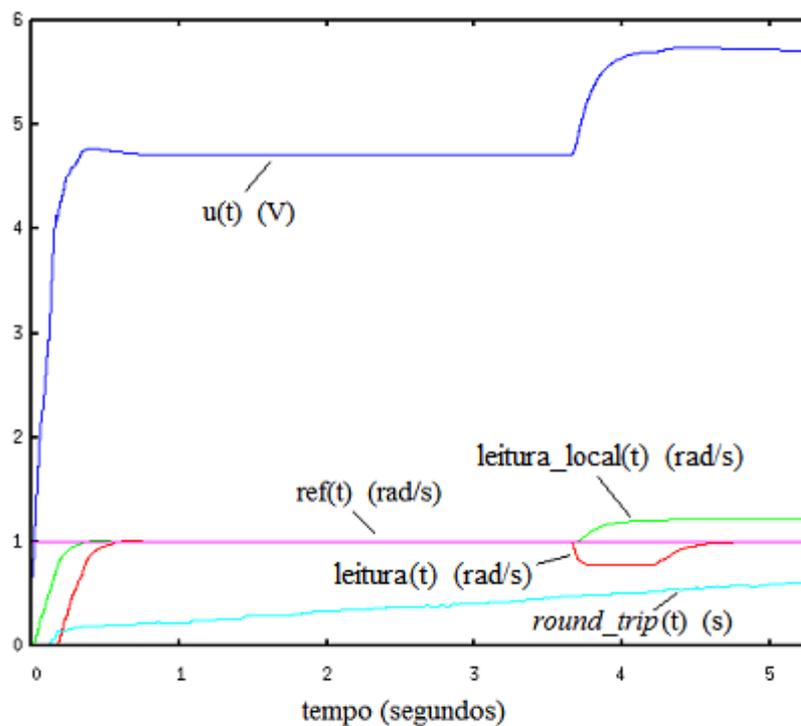
**Figura 56:** Controle com Preditor de Smith e ajustes de atrasos para *roundtrip* crescente (170 ms a 1040 ms) e com *jitter*.



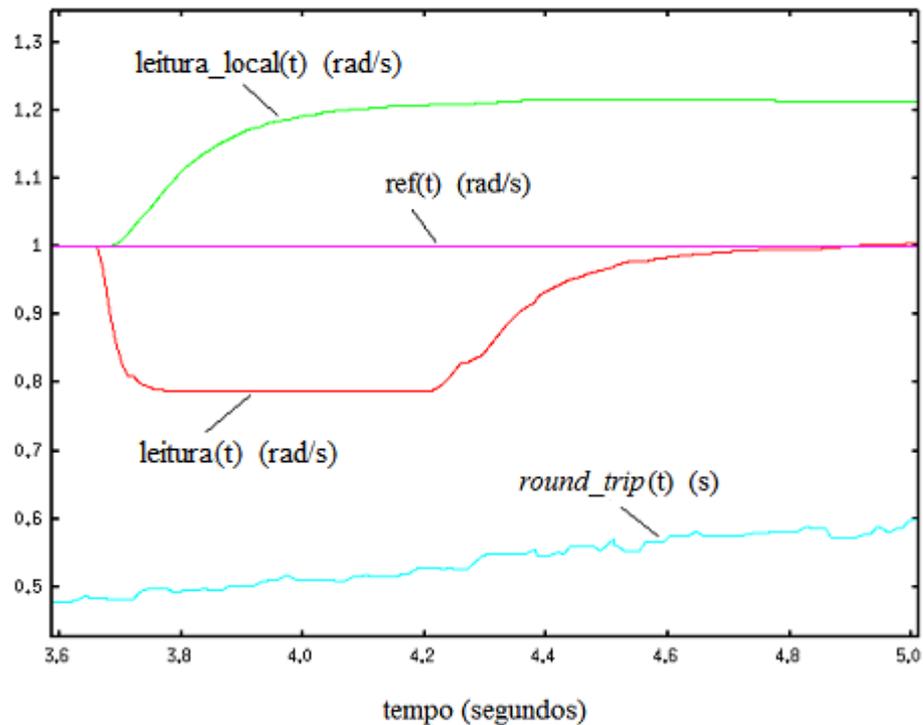
**Figura 57:** Destaque da curva de *roundtrip* (s) pelo tempo (ms) da figura anterior.

O resultado apresentado pela curva de resposta das Figura 56 e Figura 57 demonstram que mesmo para grandes atrasos o sistema se mantém estável. O reflexo do atraso se dá no tempo de resposta do sistema, i.e., o controle começa a ter seu efeito a partir de um período de tempo correspondente ao atraso do controle para a planta, como se percebe na diferença do traçado entre as curvas que representam a saída do modelo e da planta.

Para uma análise da eficiência do método, considera-se no teste a seguir um desajuste no *driver* que alimenta o motor com a potência necessária. Como pode se observar nas Figura 58 e Figura 59, o compensador começa a corrigir a saída do motor a partir do tempo de *roundtrip*. Nota-se que para este ajuste, o erro que inicialmente percebido na saída do motor, passou para a saída do modelo. Se o projeto a ser aplicado esta técnica tolerar tal atraso, ele se demonstra estável e apresenta uma curva de resposta similar a de um controle local, apenas deslocada pelo tempo de *roundtrip*.



**Figura 58:** Curva de resposta um desajuste no driver de corrente do motor em regime permanente.



**Figura 59: Destaque da figura anterior a partir do desajuste do driver de corrente do motor.**

Analisando-se para uma perturbação momentânea no estado da planta deste experimento, em regime permanente quando o tempo de *roundtrip* era aproximadamente 500 ms, observa-se nas Figura 60 e Figura 61 que o sobrepasso resultante na saída do modelo junto ao motor, acabou ocorrendo após o tempo de *roundtrip* também na saída do motor, quando este já havia voltado a seguir a referência.

Tal efeito não é desejado e portanto, esta solução pode não ser adequada para aplicações cujo sistema controlado seja suscetível a perturbações na forma de impulsos.

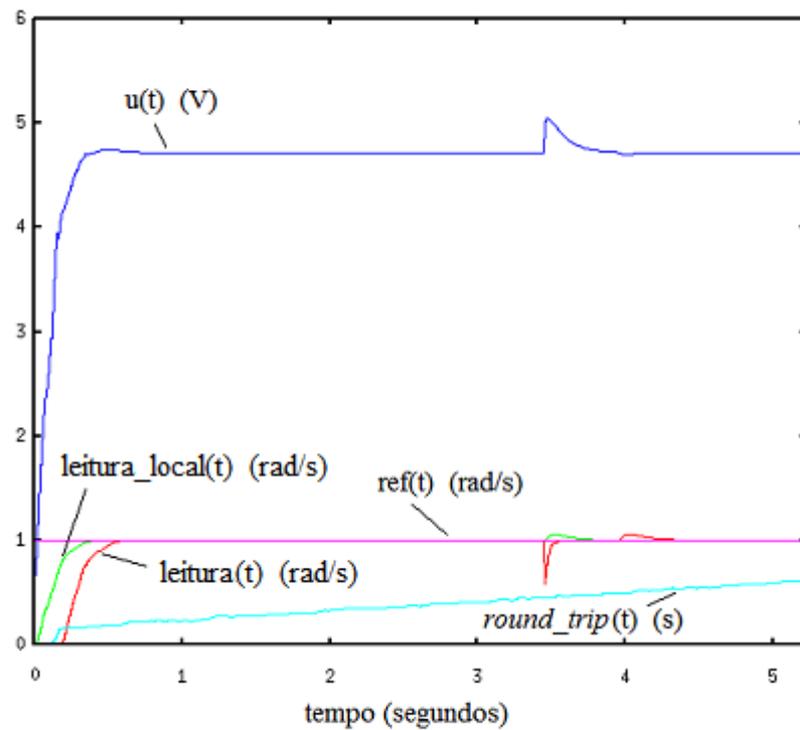


Figura 60: Curva de resposta a perturbação momentânea em regime permanente.

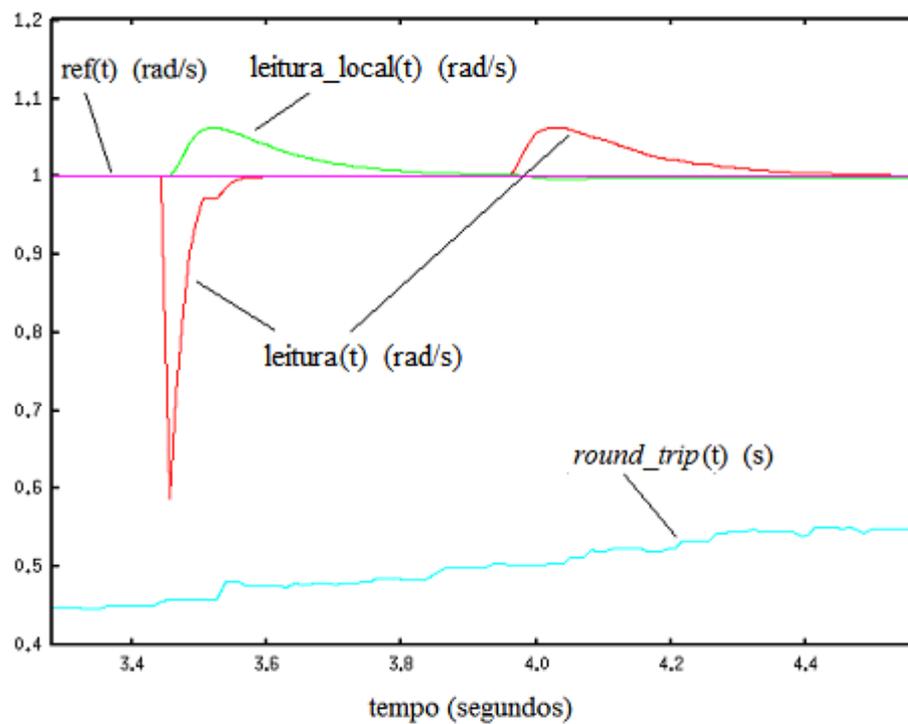


Figura 61: Destaque do momento da perturbação da figura anterior.

#### 4.2.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS DUAS SOLUÇÕES TESTADAS COM COMPENSAÇÃO DE ATRASO VARIANTE

Nas seções anteriores foram descritas as diversas partes dos experimentos realizados. A planta, a rede e os controladores com e sem compensação de atraso variante. A partir dos resultados, apresentados por meio de gráficos das curvas de resposta dos sistemas à entrada do tipo degrau, foi constatada a eficiência em melhorar o comportamento do sistema, tanto quanto a sua estabilidade quanto ao seu desempenho, tanto quando aplicada a solução de (ALT, 2003) como quando aplicada a nova proposta.

Embora constatada a melhora em ambos os casos, os resultados diferem. A primeira solução, de (ALT, 2003), se mostra eficiente para compensar variações em torno de um atraso médio, mas dentro da faixa de atraso médio testado o sistema tornou-se instável a partir de certo valor, como visto na Figura 51. Na segunda solução, com preditor de Smith e compensação de variações de atraso, onde foram utilizadas informações de tempo transferidas via rede juntamente com os sinais de controle e da planta, assim com em (ALT, 2003), o desempenho foi similar ao que seria sem os atrasos de rede. Também foi mantida a estabilidade dentro de toda faixa de atraso testada. Este resultado foi constatado pelas curvas da Figura 56.

Apesar da solução proposta ter apresentado um bom resultado, observa-se um comportamento não desejado na Figura 60. O *roundtrip* no momento em que foi aplicada uma perturbação momentânea (impulso) era maior que a constante de tempo do sistema, quando o sinal de controle para compensar a perturbação chegou a planta, esta já havia estabilizado. O resultado foi que o controle, embora mantendo a estabilidade, acabou tirando a saída da planta da referência por um instante. Já em perturbações que se mantêm por períodos maiores que o do *roundtrip*, como a vista na Figura 58, o resultado do controle mostrou-se promissor.

Um quadro comparativo na tabela abaixo, com os critérios IAE, ITAE, ISE e ITSE, demonstra a melhora de desempenho do sistema das duas soluções em relação ao sistema sem o atraso compensado.

**Tabela 5: Resultados segundo critérios ISE, IAE, ITSE e ITAE**

| <b>Critério</b>                                 | <b>Sem<br/>Compensação</b> | <b>Tipo (Alt, 2003)</b> | <b>Solução Proposta<br/>com Pred. de Smith</b> |
|---|----------------------------|-------------------------|--|
| $ISE = \int ((\theta_{ri} - \theta_i(t))^2) dt$ | 0,45593628036              | 0,19588795345           | 0,10188476597                                  |
| $IAE = \int  (\theta_{ri} - \theta_i(t))  dt$   | 1,20768459939              | 0,34966304230           | 0,14391619774                                  |
| $ITSE = \int t(\theta_{ri} - \theta_i(t))^2 dt$ | 56,7027310627              | 2,7595136418            | 0,58210854434                                  |
| $ITAE = \int t (\theta_{ri} - \theta_i(t))  dt$ | 232,282139082              | 16,2446077907           | 1,32906297623                                  |

## 5 CONCLUSÃO

O intuito do trabalho realizado foi o levantamento e soluções de restrições que surgiram quando se começou a pensar no uso de redes IP para laços de controle. A importância disso se dá pelo fato deste tipo de rede ter se tornado o grande meio de comunicação atual, permitindo um uso otimizado e mais acessível, devido a produção de seus componentes em larga escala. Também se destaca em redes IP, o grande potencial de integração. Ela pode ser usada em diversos níveis, em controle, como visto neste texto, em envio de informações do chão de fábrica a informações administrativas. Objetivando o uso em malhas de controle, foram abordadas soluções que procuram melhorar o desempenho da rede IP e outras abordagens foram feitas sobre algoritmos de controle para compensar o comportamento de atrasos que degradam os sistemas.

Com a finalidade de se entender as características da rede, foram apresentadas algumas informações que compõe pacotes IP e que embora existam protocolos para informar a camada de aplicação quanto as condições desta, tais como RTP e RTCP, estes não garantem somente por eles um atraso controlado. Para melhorar as características de *jitter* no atraso de transporte da rede, em (LIU *et al*, 2005) foi proposto um novo algoritmo de controle na camada de transporte. Já em (COSTA; NETTO; PEREIRA, 2004), foi demonstrado que para redes IP baseadas em um estrutura com *switches*, com apenas um terminal por porta ou outro *switch*, é possível se equacionar o tempo máximo, tendo-se assim uma rede com determinismo. Além desta arquitetura, também é adotada uma política de filas para diferentes serviços, podendo-se a elas atribuir prioridades diferenciadas.

Levando-se em consideração as características de variabilidade do atraso de redes IP, foram investigadas diversas soluções nos algoritmos de controle que demonstraram resultados melhores do que os obtidos com algoritmos convencionais.

O ensaio que se baseou na solução de (ALT, 2003) apresentou uma melhora significativa no desempenho da resposta simulada, reduzindo o sobrepasso e o tempo de acomodação. Mas foi observado, que deve-se ter cautela quanto ao atraso, que a partir de um valor, dependente do sistema, leva a instabilidade.

Foi então feito um novo ensaio, baseado então no preditor de Smith. Uma característica já conhecida deste preditor, é que o bom funcionamento do controle depende de um bom modelo da planta e também de um atraso bem conhecido (invariante). Quanto ao modelo, deve-se usar uma boa técnica de modelagem, o que não fez parte do escopo deste trabalho, já o atraso, este é incerto e variante com o tempo em redes IP, como dito anteriormente. Para resolver este problemas, foi feita uma alteração, onde o atraso é calculado a cada novo pacote de informações e com o resultado se busca compensá-lo, obtendo-se um valor de comparação de uma posição correspondente de uma estrutura de dados, como visto na Seção 4.1. O resultado deste algoritmo demonstrou a sua eficiência, foi superado o problema do atraso variante e mantidas as características de respostas de sistemas com preditor de Smith com atraso fixo. Isso ocorre, porque o atraso é ajustado para o preditor a cada novo cálculo do controle e o modelo local da planta não permite que o sinal de controle seja incrementado indefinidamente até que se passe um período de *roundtrip* para se obter uma resposta dos sensores. Também se deve ao fato de que a dinâmica do sistema implantado é mais rápida que a dinâmica do atraso.

Este último ensaio, embora tenha demonstrado um bom resultado, especialmente para a resposta ao degrau e a um desajuste na entrada do sinal de controle da planta (Figura 58), também apresentou um comportamento que pode ser inadequado para perturbações momentâneas, conforme Figura 60.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se a viabilidade do uso de malhas de controle com realimentação sobre redes IP. Percebe-se também, que as técnicas adotadas ainda podem ser melhoradas.

Em trabalhos futuros, para ser resolvido o problema ocorrido no último ensaio com preditor de Smith, onde a saída da planta não foi adequada quando o sistema foi submetido a uma perturbação do tipo impulso, pode se pensar mais uma vez em uma nova solução. Assim como foi feito no experimento de (ALT, 2003), pode ser feita uma estimativa do estado da planta no momento em que essa receberá o novo sinal de controle sendo gerado. No presente experimento, pode-se ter disponível, junto com o sinal de saída do motor, também o sinal de controle que estava sendo aplicado naquele momento e o *roundtrip*. Com estas informações, o controlador pode saber a seqüência de sinais de controle que o motor ainda receberá antes do novo sinal sendo calculado e então estimar a saída no momento desejado. No entanto, esta solução terá provável eficiência, apenas para aplicações onde as possíveis perturbações ocorram em períodos maiores do que o *roundtrip*. Trata-se de uma solução com mais variáveis e menor probabilidade de sucesso, sendo apropriado o seu uso a um grupo mais restrito de aplicações.

## REFERÊNCIAS

- ALT, Gustavo H. **Controle em Tempo Real de Robôs através de Redes IP**. 2003. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- BAHIL, A. Terry. A Simple Adaptive Smith-Predictor. for. Controlling Time-Delay Systems. Pittsburgh: Biomedical Engineering Program, Department of Electrical Engineering, Carnegie-Mellon University, PA 15213. **Control Systems Magazine**, p. 16-22, May 1983.
- BAUER, Peter *et al.* **A New Class of Smith Predictors for Network Congestion Control**. New York: IEEE, 2001.
- BAZANELLA, A. S.; GOMES, J. M. S. Jr. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- BRADEN, R. **Requirements for Internet Hosts: communication layers: RFC 1122**. [S.l.]: Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1989.
- CASAVOLA, A.; PAPINI, M.; FRANZÈ, G. Supervision of Networked Dynamical Systems Under Coordination Constraints. **IEEE Transactions on Automatic Control**, [S.l.], v. 51, n. 3, p. 421-437, Mar. 2006.
- COSTA, Rafael Pinto; NETTO, João C.; PEREIRA, C. E. Analysis of Traffic Differentiation on Switched Ethernet. In: EUROMICRO CONFERENCE ON REAL-TIME SYSTEMS, 16., 2004, Catânia. **Proceedings...** Catânia: [s.n.], 2004. p. 45-48.
- FAGUNDES, Rubem Ribeiro. **Elementos de Sistemas Lineares de Controle**. Porto Alegre: [s.e.], 1989. 212 p.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ltda, 1975. ISBN: 0-07-090132-5.
- FLOYD, S.; FALL, K. Promoting the Use of End-to-End Congestion Control in the Internet. **IEEE/ACM Trans. Netw.**, v. 7, n. 4, p. 458–472, Aug. 1999.
- GROSSMAN, D. **New Terminology and Clarifications for Diffserv: RFC 3260**. [S.l.]: Network Working Group, 2002.
- HEMERLY, E. M. **Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2000.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. **ITU-T Recommendation G.114: One-way transmission time**. [S.l.]: May, 2003.

LAGES, W. F. **Controle e Estimação de Posição e Orientação de Robôs Móveis**. 1998. 180 p. Tese (Doutorado em Ciência no Curso de Engenharia Eletrônica e Computação na Área de Sistemas de Controle) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1998.

LIAN, Feng-Li. **Analysys, Design, Modeling, and Control of Networked Control Systems**. 2001. 194 p. Dissertation (Ph.D.) – Mechanical Engineering in the University of Michigan, 2001.

LIMA, Hugo Santana. **Convergência de Redes – NGN – Next Generation Network**. Disponível em: <[http://professores.unisantabr/santana/downloads%5CTelematica%5CCom\\_Dados\\_2%5Cngn1\\_%20parte%201.pdf](http://professores.unisantabr/santana/downloads%5CTelematica%5CCom_Dados_2%5Cngn1_%20parte%201.pdf)>. Acesso em: ago. 2007.

LIU, P. X. *et al.* An End-to-End Transmission Architecture for the Remote Control of Robots Over IP Networks. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, [S.l.], v. 10, n. 5, Oct. 2005.

MARSHALL, J. E. Sensitivity Considerations of Smith's Method for Time-Delay Systems. **Electronics Letters**, v. 10, n. 15, Jul. 1974.

MONTUFAR-CHAVEZNAVA, R.; MENDEZ-POLANCO, J. A. Multiagent Architecture for Telerobotics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATIONS AND COMPUTERS (CONIELECOMP), 15., 2005, Puebla, Mexico. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005.

NICHOLS, K. *et al.* **Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers**: RFC 2474. [S.l.]: Network Working Group, 1998.

POSTEL, J. **Internet Protocol**: RFC 791. Arlington, Virginia: Defense Advanced Research Projects Agency – Information Processing Techniques Office, 1981.

RAMAKRISHNAN, K.; FLOYD, S.; BLACK, D. **The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP**: RFC 3168. [S.l.]: Network Working Group, 2001.

RTAI. **RealTime Application Interface for Linux from DIAPM**. Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale. Disponível em: <<https://www.rtai.org/>>. Acesso em: jan. 2006.

SCHULZRINNE, H.; CASNER, S; FREDERICK, R. **RTP: a transport protocol for real-time applications**: RFC 3550. [S.l.]: Network Working Group, 2003.

TIPSUWAN, Yodyium; CHOW, Mo-Yuen. **Control Methodologies in Networked Control Systems**. *Control Engineering Practice* 11, n. 10, fev. 2003.

WANG, S.; XU, B; WANG, Q. Delays Analysis for Teleoperation over Internet and Smith Predictor with Adaptive Time-delay Control. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND BIOMIMETICS, 2005, [S.l.]. **Proceedings...** New York: IEEE, p. 664-669, 2005.

WITHEEPHANICH, K.; TIPSUWANPORN, V. Simultaneously Stabilizing Controller Structure Design for Control over Network with Plant Uncertainties. **IEEE International Conference on Control Applications**, 2006, p. 1073-1078.

XIAO, X.; NI, L. M. Internet QoS: A Big Picture. **IEEE Network Magazine**, [S.l.], v. 13, n. 2, p. 8-18, Mar./Apr. 1999.

ZEILMANN, Rafael Pereira. **Uma Estratégia para Controle e Supervisão de Processos Industriais via Internet**. 2002. 140 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ZERBETTO NETO, Angelo. **Análise do Impacto da Comunicação em Redes Foundation Fieldbus no Desempenho de Sistemas de Controle**. 2006. 94 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.