

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO E DESEMPENHO DE REDES "FIELD BUS" PARA O  
CONTROLE EM MALHA FECHADA COM AÇÃO DE UM PREDITOR NEBULOSO EM  
CASO DE PERDAS DE MENSAGENS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO MARQUES SALOMÃO

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1994

**ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO E DESEMPENHO DE REDES "FIELD BUS" PARA O  
CONTROLE EM MALHA FECHADA COM AÇÃO DE UM PREDITOR NEBULOSO EM  
CASO DE PERDAS DE MENSAGENS**

**JOÃO MARQUES SALOMÃO**

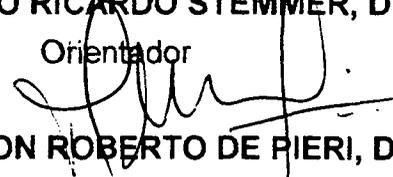
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

**MESTRE EM ENGENHARIA**

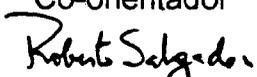
ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONTROLE,  
AUTOMAÇÃO E INFORMÁTICA INDUSTRIAL, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. MARCELO RICARDO STEMMER, Dr.-Ing.**

Orientador

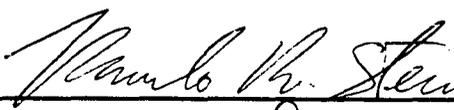
  
\_\_\_\_\_  
**PROF. EDSON ROBERTO DE PIERI, Dr.**

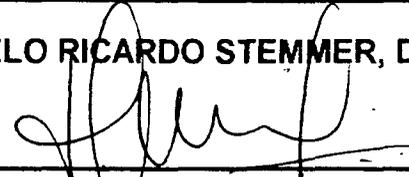
Co-orientador

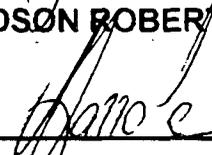
  
\_\_\_\_\_  
**PROF. ROBERTO DE SOUZA SALGADO, PhD.**

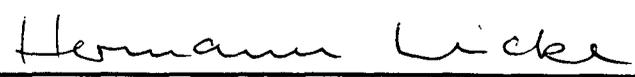
Coordenador da Pós-Graduação Eng. Elétrica

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. MARCELO RICARDO STEMMER, Dr.-Ing., Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. EDSON ROBERTO DE PIERI, Dr.**

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. VITORIO BRUNO MAZZOLA, Dr.**

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, Dr.-Ing.**

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Nascido em Ituêta-MG, em janeiro de 1956. Licenciou-se em Física em 1982 e graduou-se em Engenharia Elétrica, ênfases em eletrotécnica e eletrônica em 1988, ambos pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Foi monitor das disciplinas de Física III e IV, durante a graduação, no então Departamento de Física e Química da UFES, estagiou no Departamento de Manutenção de Subestações da ESCELSA (Espírito Santo Centrais Elétricas S.A.) em 1987, atuou como engenheiro na FTI-CEMAR-SP (Fundação de Tecnologia Industrial - Centro de Materiais Refratários - Lorena - São Paulo) em 1988, é professor do Curso Técnico de Eletrotécnica da Escola Técnica Federal do Espírito Santo (ETFES) desde 1985. Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), área de concentração: Controle, Automação e Informática Industrial, em março de 1992. Em 1993, iniciou o desenvolvimento deste trabalho de dissertação de mestrado junto ao Laboratório de Controle e Microinformática (LCMI). Seus principais interesses de pesquisa concentram-se nas áreas de sistemas de tempo real, lógica e controle nebuloso e redes de comunicação para aplicações industriais.

a meus pais, a minha esposa, a meus filhos e a Profa. Natalia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- especialmente aos orientadores Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing. e Prof. Edson Roberto de Pieri, Dr. pela orientação, presteza e amizade no decorrer deste trabalho;
- aos professores Vitório Bruno Mazzola, Dr. e Hermann Adolf Harry Lücke, Dr.-Ing., membros da banca examinadora, pelas críticas, sugestões e contribuições fornecidas ao trabalho;
- ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), ao BANDES (Banco de Desenvolvimento do Estado do Espírito Santo) e a ETFES (Escola Técnica Federal do Espírito Santo) pelo apoio financeiro;
- a UFSC/PPGEEL/LCMI (Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Laboratório de Controle e Microinformática) pela oportunidade e pelo apoio que me foram dados;
- ao Prof. Júlio E. Normey Rico, Msc., responsável pelo Laboratório de Ensino de Controle, ao Eng. Marcelo F. Webster e a Fundação CERTI (Centro Regional de Tecnologia em Informática) de Santa Catarina, pelo apoio material;
- a Rachel, Juliana, Mariana e Martinho pela compreensão, resignação, carinho e por toda a atenção dispensada;
- a Profa. Natalia Boboshko, Dra. pelas longas discussões de cunho científico durante a fase de graduação, pelo incentivo e por todo o conhecimento que me proporcionou;
- aos meus amigos Alberto, Carla, Carlos Jorge, Fernando Busch, Francisco Felipe, Idmilson, Luis Otavio, Luizinho, Udo Fritzke Jr. e a todos com quem convivi durante o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II .....	6
REDES LOCAIS PARA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL .....	6
2.1 - Introdução .....	6
2.2 - Níveis Hierárquicos de Comunicação na Estrutura Fabril .....	7
2.3 - A Exigência de Acesso Determinístico ao meio Físico .....	8
2.4 - O Projeto e a Arquitetura MAP .....	10
2.4.1 - As Arquiteturas MAP-EPA e Mini-MAP .....	12
2.5 - As Redes em Barramento de Campo ou "Fieldbus" .....	14
2.5.1 - A proposta PROFIBUS .....	15
2.5.2 - A proposta FIP .....	18
2.5.3 - A proposta ISA/SP 50 .....	22
2.5.4 - A Rede Bitbus .....	25
2.5.5 - A proposta CAN (Controller Area Network) .....	26
2.6 - Tendências de padronização de rede "Fieldbus" .....	28

5.5 - Resultados e Gráficos obtidos para o Controle de Posição.....	73
CAPÍTULO VI .....	76
CONCLUSÃO GERAL.....	76
Referências Bibliográficas. ....	81

## RESUMO

A aplicação de redes de comunicação na indústria de acordo com a filosofia CIM (Computer Integrated Manufacturing), proporciona uma perfeita integração hierárquica de todos os níveis de produção industrial (planejamento, área, célula, subsistema e componente) envolvidos. Para tanto, cada nível hierárquico deve ser constituído de um subsistema inteligente e possuir um sistema de comunicação com propriedades e características adequadas àquele caso (por exemplo, MAP-TOP, MAP-EPA, Mini-MAP ou FIELDBUS).

A nível de componente, sobre o qual foi desenvolvido este trabalho, o uso de uma rede Fieldbus permite monitorar o estado de variáveis da manufatura e o controle de processo multimalhas de variáveis contínuas. Este nível é caracterizado por possuir:

- grandezas da manufatura a serem controladas com altas dinâmicas, acarretando pequenos períodos de amostragem;
- ambiente com elevado nível de ruídos de origem eletromagnética, proporcionando a perda ou dano de um grande número de mensagens ao longo da rede de comunicação.

Como consequência, o sistema de comunicação deverá possuir características de tempo real e deverá incorporar, de forma distribuída, uma estratégia de ação para o caso da perda de mensagens em casos onde não há tempo para repetição do envio dos "frames". Para tal, é proposto, neste trabalho, um mecanismo de predição da ação de controle operando paralelamente ao algoritmo do controlador principal.

Este trabalho consiste no estudo e análise de desempenho temporal de uma rede Fieldbus e sua adequação à aplicações em malhas fechadas de controle a nível de "componente" no chão de fábrica. Consiste, ainda, na implementação de um preditor da ação de controle baseado em lógica nebulosa (fuzzy logic) com o objetivo de amenizar a degradação do controle causada pelas perdas de mensagens devidas à grande susceptibilidade a perturbações na rede de comunicação.

## ABSTRACT

The application of communication networks in the industry according to the CIM (Computer Integrated Manufacturing) philosophy gives a perfect hierarchical integration of all industrial levels such as factory, shop, cell, subsystem and component. In this case, each hierarchical level should be made of intelligent subsystems and a communication system with adequate characteristics concerning that level (for example, MAP-TOP, MAP-EPA, Mini-MAP or FIELDBUS).

At the component level, where this work was developed, a Fieldbus Network allows the supervision of the states of the manufacturing variables and the simultaneous control of various feedback loops. This level has the following characteristics:

- manufacturing variables to be controlled with high dynamics resulting into short sample periods;
- environment with a high level of noise causing the loss or damage of a great number of messages through the communication network.

Consequently, the communication system must have real time characteristics and also incorporate a strategy of action in a distributed manner in case of message losses, mainly in cases where there is no time for a frame retransmission. To do so, a predictor of the control action to be executed simultaneously with the main controller is proposed.

This work is concerned with the study and analysis of the Fieldbus temporal performance, and its adequacy to the application in closed loop control at the component level. The development and implementation of a predictor based on fuzzy logic is also presented. This predictor is to be executed in parallel with the main controller in case of message losses.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A sociedade atual, tanto nos sistemas sociais como nos tecnológicos, caracteriza-se por uma busca constante da informação rápida e segura dos temas que lhes diz respeito. Tais informações são imprescindíveis, entre outras coisas, nas transações comerciais, na melhoria do relacionamento entre as pessoas, nas tarefas do cotidiano, no aumento da qualidade de vida das comunidades e, por fim, na própria sobrevivência humana.

Na área fabril, a obtenção de informações sobre o comportamento dos processos em todos os níveis de produção, além de permitir uma maior integração entre eles, possibilita, ainda, entre outras coisas, mudanças rápidas na linha de produção objetivando adequar o produto a alterações do mercado consumidor, aumento na qualidade, diminuição das perdas e redução do seu custo final.

As complexas exigências tecnológicas dos dias atuais encontra pela frente o aliado e revolucionário processo de desenvolvimento tecnológico dos microprocessadores que, a cada dia, aumentam sua velocidade, sua robustez e tamanho das palavras processadas e diminuem, por outro lado, seu conjunto de instruções, seu tamanho e seus custos, possibilitando a implementação de estações inteligentes, inclusive a nível de sensores e atuadores, a um custo reduzido. Possibilitam, ainda, que complexos algoritmos de controle, concebíveis somente em teoria há uma década atrás, possam hoje ser empregados em plantas industriais cuja limitação agora é a própria teoria de controle.

Neste contexto, a aplicação de redes de comunicação na interligação de computadores que atenda a contento os requisitos de cada sistema passou a ser um dos grandes desafios tecnológicos. Assim, apesar da interconexão de grande parte de instituições governamentais, de pesquisa e comerciais de praticamente todos os países do mundo através de

redes internacionais, a busca por padrões de comunicação e sua aplicação de fato a determinados níveis hierárquicos da estrutura fabril através das redes locais industriais ainda continua, notadamente, nos níveis hierárquicos inferiores da mesma.

As exigências temporais dos níveis hierárquicos inferiores ou "chão de fábrica" da estrutura fabril são tais que proporcionaram o surgimento de redes de comunicação industriais em barramento de campo ou "Fieldbus", cuja performance pretendida deve ser adequada às aplicações deste nível. A principal aplicação prevista para redes "Fieldbus" é a interligação de componentes inteligentes simples, tais como sensores, atuadores e controladores. Estes componentes estão, via de regra, envolvidos em malhas fechadas de controle.

No controle de grandezas a nível de "chão de fábrica", deve-se ter em conta que:

- a) o ambiente pode ser hostil em relação à temperatura ou presença de óleo, poeira, elementos inflamáveis e outros resíduos industriais. Além disso, o elevado nível de ruídos de origem eletromagnética proporciona uma maior possibilidade de deturpação dos sinais a serem transmitidos pelo meio de comunicação;
- b) a dinâmica das grandezas controladas ou monitoradas é frequentemente elevada e pode exigir um pequeno período de amostragem;
- c) o principal objetivo em se utilizar a rede de comunicação como suporte de transmissão é o controle multi-malhas.

Neste trabalho, pretende-se avaliar a performance das principais redes industriais do tipo "Fieldbus" tendo em vista aplicações em malhas fechadas de controle na automação da manufatura e de processos contínuos, visando analisar sua adequação para tais aplicações. Neste caso, conforme sugerido pela figura 1.1 apresentada abaixo, os sistemas de controle convencionais analógicos e digitais ponto a ponto terão suas várias malhas de controle fechadas através de uma rede de comunicação do tipo "Fieldbus".

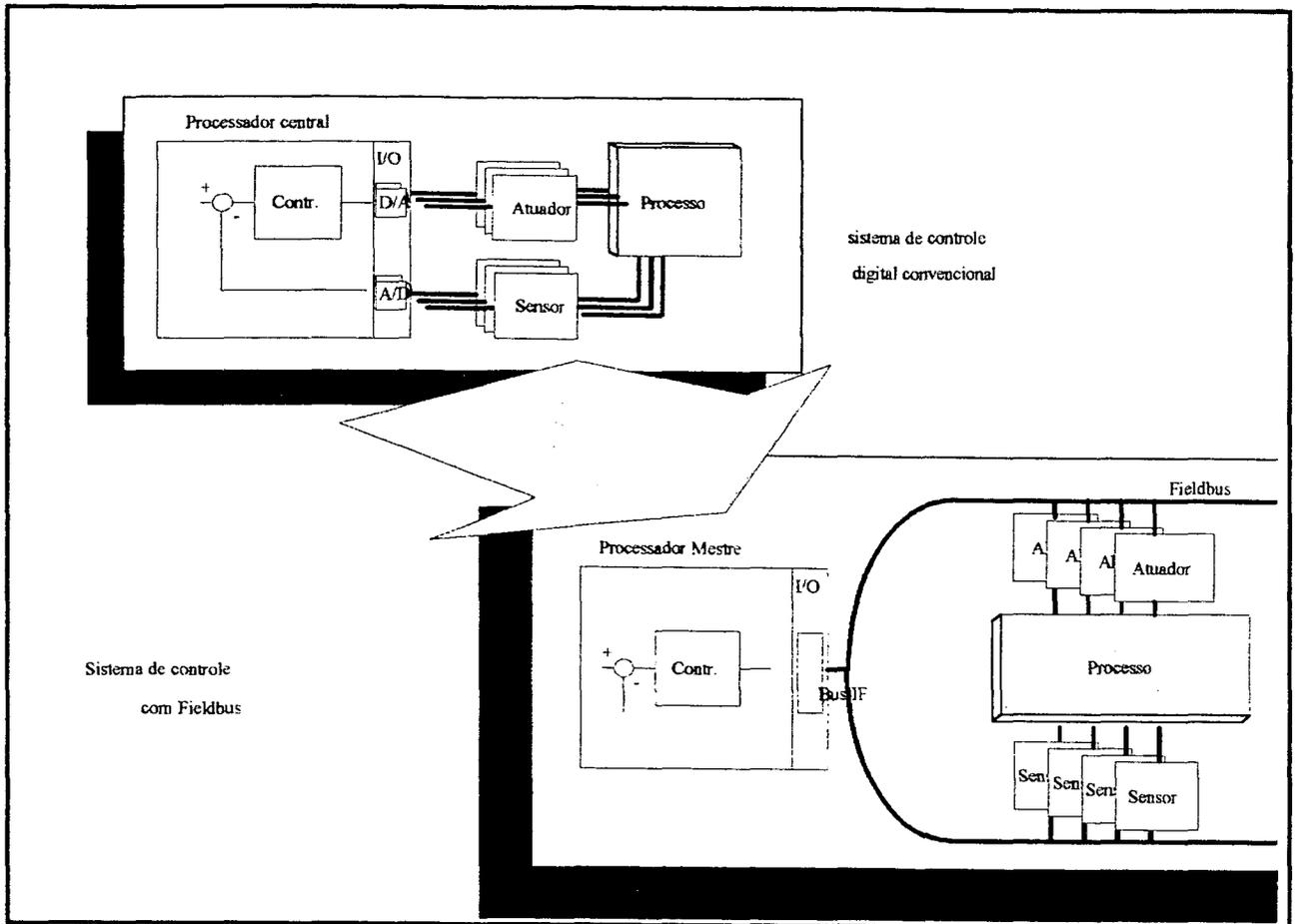


Figura 1.1 - Substituição do controle convencional por uma rede "Fieldbus"

Para tal, serão analisadas inicialmente as características dinâmicas das principais grandezas do controle de processo e da manufatura, procurando estabelecer um confronto comparativo entre o período de amostragem dessas grandezas e os tempos de transmissão de mensagens para os diversos tipos de serviços oferecidos pelas redes de comunicação.

Em seguida, em face da constatação de que o tempo para retransmissões das possíveis mensagens perdidas é muito reduzido, será apresentada a implementação de um preditor da ação de controle, baseado em lógica nebulosa (fuzzy logic), bem como os resultados obtidos quando o mesmo opera em paralelo com um controlador PID, com perdas de mensagens simuladas. A estratégia proposta foi testada no controle de posição de uma planta didática.

Finalmente, serão apresentados os resultados práticos obtidos no controle de posição da referida planta, cuja malha, fechada através de uma rede padrão PROFIBUS, é constituída de

três estações que incorporam o mecanismo sensor, o algoritmo de controle convencional e o algoritmo do preditor, o mecanismo atuador e o protocolo da rede.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, consistindo cada um deles dos seguintes temas:

- No capítulo II serão apresentados os níveis hierárquicos de comunicação da manufatura com os seus respectivos requisitos de comunicação, uma análise dos principais métodos de acesso ao meio (determinísticos e não-determinísticos), uma breve descrição dos tipos de redes industriais (MAP, MAP-EPA, Mini-MAP) e as redes de comunicação industrial para o nível de componente (FIP, PROFIBUS, ISA/SP 50, BITBUS, CAN), concluindo com a apresentação dos requisitos necessários ao sistema de comunicação para contemplar as aplicações de tempo real a nível hierárquico de componente.

- O capítulo III tratará do estudo e análise dos requisitos temporais das principais grandezas da automação industrial (controle de processo e automação da manufatura), procurará estabelecer uma relação entre os requisitos temporais impostos pela dinâmica da grandeza a ser controlada e o período de amostragem a ser escolhido. Em consequência disso, será proposto um perfil da rede de comunicação que mais se adequa às restrições impostas. Ainda neste capítulo, serão analisadas as redes de comunicação disponíveis ou propostas para esse tipo de aplicação no sentido de verificar o atendimento ao perfil desejado, concluindo o mesmo com a apresentação do problema a ser resolvido em consequência das perdas de mensagens diante de um tempo reduzido para retransmissão (período de amostragem) estabelecido para as grandezas da manufatura.

- No capítulo IV, será apresentada e implementada uma estratégia de predição de controle através do uso da lógica nebulosa (Fuzzy Logic), cujo preditor, dentro do sistema distribuído, irá operar em paralelo com um controlador convencional (por exemplo, PID). Além disso, será analisado o funcionamento de tal proposta na implementação de um controle de posição de uma bancada didática usando-se uma rede local industrial do tipo PROFIBUS.

- O capítulo V apresentará o hardware e a estrutura de implementação proposta, além da integração dos vários softwares e os resultados obtidos acompanhados dos gráficos, comentários e justificativas das limitações de performance, vantagens e desvantagens da rede e da estratégia proposta para o mecanismo de predição do controle implementado.

- O capítulo VI apresentará, como finalização deste documento, um resumo geral de todos os capítulos com uma análise de todas as vantagens e desvantagens do método empregado, ressaltando as contribuições do trabalho e propondo possíveis melhorias, bem como tópicos de estudo para futuros trabalhos.

# CAPÍTULO II

## REDES LOCAIS PARA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

### 2.1 - Introdução.

A tendência de informatização das empresas permite por um lado, acelerar cada processo que faz parte da fabricação de um produto ou do oferecimento de um serviço e, por outro, gerar uma nova necessidade em relação ao modo como as informações serão trocadas.

As redes locais de comunicação proporcionam uma perfeita integração de todas as atividades empresariais, por permitirem levar em conta as particularidades de cada processo de fabricação ou de fornecimento de um serviço do ponto de vista das necessidades de comunicação envolvidas, tais como: compartilhamento de recursos, evolutividade, gerenciamento de atividades heterogêneas e diferentes tipos de diálogos que podem ser estabelecidos [Stemm91].

A maior parte das redes de comunicação existentes no mercado baseiam-se no protocolo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), as quais são capazes de atender requisitos de forma eficiente quando se trata da automação de escritórios, não sendo, em geral, apropriadas à comunicação de dados quando se trata de ambientes fabris.

O ambiente fabril apresenta as seguintes características principais: hostilidade (elevado nível de ruídos de origem eletromagnética, temperaturas elevadas, e etc.), troca de um grande número de pequenas mensagens entre equipamentos e não entre operador e equipamento, tempos de resposta e segurança dos dados críticos. Sendo assim, além dos fatores econômicos envolvidos, outros requisitos, tais como: garantia de um tempo de resposta, débito da informação, robustez dos equipamentos e da informação, são fundamentais na especificação da rede de comunicação para esse tipo de aplicação.

Nas últimas décadas, tem sido realizado um esforço considerável objetivando a definição de arquiteturas de comunicação que atendam as características e requisitos mencionados acima, e que ainda tenham compatibilidade com o modelo de referência OSI (Open Systems Interconnection) da ISO (International Standards Organization) [Zimmer80]. Desta forma, os exemplos mais importantes, até mesmo pelo pioneirismo, são as propostas de arquiteturas MAP (Manufacturing Automation Protocol) e TOP (Technical and Office Protocols), seguindo-se a proposta de arquitetura da classe barramento de campo (Fieldbus) e que, atualmente, encontra-se em processo de padronização, sendo mais voltada para aplicações do "chão de fábrica", que também serão apresentadas neste capítulo.

## 2.2 - Níveis Hierárquicos de Comunicação na Estrutura Fabril.

A moderna indústria automatizada é hoje hierarquizada em diferentes níveis, segundo a filosofia CIM (Computer Integrated Manufacturing). Os elementos inteligentes de cada nível são interconectados através de redes locais de comunicação, formando uma hierarquia de redes que se comunicam através de conversores de protocolo (gateways), pontes (bridges) ou roteadores (routers).

Nesta organização, observa-se uma tendência descentralizadora de particionamento e abstração na abordagem do problema. Conseqüentemente, têm-se subsistemas independentes, dotados de inteligência local, interagindo entre si e submetidos a uma condução/supervisão central do sistema como um todo [Stemm91]. A figura 2.1 mostra esses níveis associados com a rede local industrial que se adequa mais apropriadamente para cada um deles.

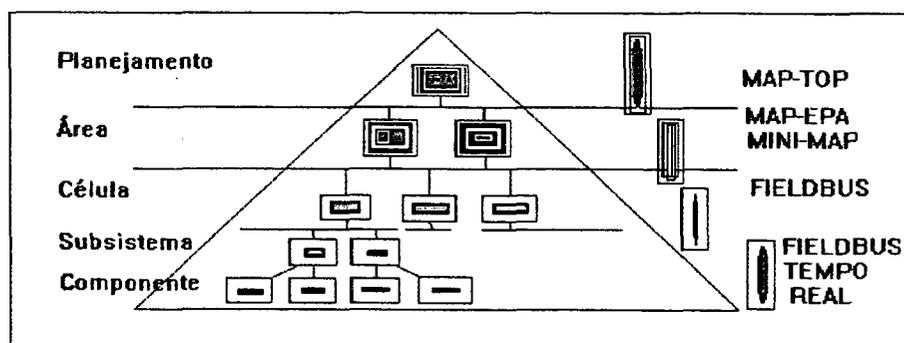


Figura 2.1 - Níveis de comunicação na hierarquia fabril

Desta forma, observa-se que cada nível da hierarquia fabril é representado por um conjunto de ações e processamentos cujos requisitos de comunicação são distintos, não existindo, deste modo, um único sistema de comunicação capaz de atender de forma eficiente todos os diferentes requisitos de cada nível hierárquico. Assim, verifica-se, por exemplo, que a transferência de um grande número de pequenas mensagens em um pequeno intervalo de tempo entre um grande número de estações caracterizam os níveis inferiores, os quais exigem sistemas de comunicação que possam contemplar aplicações críticas no tempo. Em contrapartida, os níveis mais elevados de comunicação apresentam, como características principais, a transferência de mensagens longas em grandes intervalos de tempo e entre um pequeno número de estações.

### **2.3 - A Exigência de Acesso Determinístico ao meio Físico.**

O meio de transmissão das redes locais com topologia em barramento constitui um recurso compartilhado entre todas as estações a ele conectado, sendo necessário protocolos específicos para definição do direito de acesso das estações. Esses protocolos são classificados em determinísticos e não-determinísticos.

As redes de comunicação que utilizam o protocolo CSMA/CD, em geral redes para aplicações em ambientes administrativos, funcionam de tal forma que uma estação, ao dispor de dados a serem enviados, endereça-os à estação que deverá recebê-los e verifica a presença de atividade no meio; se esse não for o caso, transmite seus dados ao mesmo tempo em que monitora a ocorrência ou não de uma colisão dos mesmos com dados transmitidos por uma outra estação qualquer. Se houver uma colisão, os dados das estações envolvidas serão novamente transmitidos após um certo intervalo de tempo, cuja duração é determinada em cada uma das estações de forma aleatória, sendo que, nesta segunda tentativa de transmissão, não há nenhuma garantia de que uma nova colisão não possa vir a ocorrer, exigindo novamente a repetição de todo o processo para se acessar o meio físico.

Esse tipo de protocolo é simples e fácil de ser implementado, além de apresentar o menor "overhead" possível, porém constitui um *protocolo não-determinístico* de acesso ao meio,

sendo que a probabilidade de ocorrência de colisões aumenta exponencialmente quando se tem um elevado número de estações, implicando em aumento e indeterminação do tempo de reação de cada estação, sendo, portanto, esse tipo de acesso ao meio inadequado em ambientes fabris devido às restrições temporais a serem cumpridas.

Os *protocolos determinísticos* de acesso ao meio, mais apropriados para aplicações em controle de processos e da manufatura, são tais que o tempo de resposta é univocamente determinável, podendo ser classificados, de acordo com os métodos de acesso, em: métodos com comando centralizado (mestre-escravos e árbitro de barramento), com comando distribuído (token-passing) e CSMA determinístico por arbitração de prioridades ou CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

Nos protocolos com comando centralizado do tipo mestre-escravos, somente uma estação atua como detentora do direito de transmissão (estação mestre), sendo esta a responsável pela distribuição do direito de acesso por tempo limitado às demais estações (escravas), que, neste caso, só podem trocar dados com a estação mestre. Já nos sistemas centralizados com árbitro do barramento, uma estação especial (árbitro do barramento) arbitra um tempo limitado de acesso ao meio para cada uma das demais estações. Isto é feito através da difusão de uma mensagem especial, que especifica o endereço da estação com direito a transmissão e o tipo de dados que ela pode difundir. Este método apresenta a vantagem de não limitar a capacidade da troca de dados de uma estação com as demais estações do barramento.

Os sistemas que usam um protocolo de comando distribuído (token-passing) permitem estabelecer mais de uma estação com direito de acessar o meio de transmissão. Isto é feito através da transmissão cíclica entre as estações de uma mensagem especial chamada "token", que garante o direito de acesso ao meio, por tempo limitado, àquela estação que a detém. Embora um pouco mais complexo que os métodos anteriores, uma vez que providências especiais devem ser tomadas se ocorrerem a perda do "token" ou a entrada e saída de uma estação na rede, este método também permite que cada estação possa trocar dados com as demais.

Os sistemas com método de acesso ao meio do tipo CSMA/CA são bastante atuais, e são tais que o acesso ao meio pela primeira vez por parte de uma estação se dá de forma semelhante ao método CSMA/CD não-determinístico, diferenciando-se deste quando da ocorrência de uma colisão entre dados de duas ou mais estações. Neste caso, os bits "1s" ou recessivos de um campo de arbitração do "frame" de uma das estações irá escrever sobre os bits "0s" ou dominantes do campo de arbitração da outra estação, ficando aquela que possui os bits dominantes (prioridade alta) com direito de acesso ao barramento. Este procedimento tem sido usado há algum tempo em barramentos I<sup>2</sup>C e D<sup>2</sup>B com sucesso. As demais estações não podem acessar o barramento e transmitir seus dados até que seja resolvido o problema das estações cujos dados colidiram.

As próximas seções deste capítulo destinam-se à apresentação, de forma resumida, dos padrões e propostas de redes de comunicação para aplicações em ambientes fabris, cujos projetos e arquiteturas são tais que empregam de uma forma ou de outra um dos métodos de acesso ao meio descritos acima.

#### **2.4 - O Projeto e a Arquitetura MAP.**

Os estudos para a aplicação de redes industriais de comunicação, que mantivessem compatibilidade com o modelo de referência OSI/ISO, em controle de processos e automação da manufatura, iniciaram-se nos anos 80 por iniciativa da GM (General Motors). Isto aconteceu devido à necessidade de redução dos custos das comunicações que, na época, exigiam conexões especiais entre equipamentos de distintos fabricantes. Desta forma, e ainda aproveitando a oportunidade oferecida no momento em que se discutia junto aos órgãos normalizadores internacionais os futuros padrões para redes locais de comunicação, nasceu o projeto MAP (Manufacturing Automation Protocol).

Sendo assim, a arquitetura MAP é constituída das sete camadas do modelo OSI, onde as camadas 1 e 2 são implementadas de acordo com as normas IEEE 802.4 ou "token bus" e IEEE 802.2 ou "Logical Link Control", mais especificamente o LLC tipo 1, que não detecta e nem recupera erros de transmissão, ficando isto a cargo da camada de transporte [MAP87].

A escolha do suporte de comunicação em banda larga (broadband) para a camada física deu-se em função dos seguintes fatores principais:

- possibilidade de vários canais sobre o mesmo suporte de comunicação, permitindo a coexistência de várias redes;
- permite a troca de sinais tais como voz e imagens, possibilitando aplicações de supervisão, circuito fechado de TV, teleconferências e etc.

Já o barramento com ficha foi escolhido por permitir a implementação de um esquema de prioridades e, ainda, pelo fato de que os equipamentos existentes na época possuíam protocolo de enlace que suportava a comunicação em banda larga, e o "token bus" era o único que possibilitava este tipo de comunicação.

O serviço sem conexão foi adotado para a camada de rede, onde cada mensagem é roteada individualmente. As regras de endereçamento adotadas para esse nível baseiam-se na norma ISO 8348 e o protocolo de roteamento foi definido pelo projeto MAP, sendo hoje normalizado pela ISO 9542.

Para a camada de transporte, adotou-se a classe 4 do protocolo ISO 8072/73 que é orientado à conexão e possui controle de erros. Sendo assim, o serviço de transporte oferece um canal de comunicação confiável, sem erros, perdas e duplicação de mensagens. Além disso, o protocolo adotado para a camada de transporte permite que as mensagens trocadas possuam qualquer dimensão. E, para a camada de sessão, adotou-se a norma ISO 8326/27, que assegura as funções de resincronização e permite a comunicação full-duplex.

A representação de dados para a camada de apresentação foi resolvida com a adoção da sintaxe abstrata ASN.1 (Abstract Syntax Notation One), que possibilita as diferentes formas de representação dos dados através de uma linguagem comum. Além disso, a nível da camada de aplicação, as principais funções oferecidas aos processos de aplicação foram definidas com base nas normas: FTAM (File Transfer, Access and Management), para permitir o acesso e

transferência de arquivos e MMS (Manufacturing Message Standard), para possibilitar a troca de mensagens entre equipamentos de produção.

O MMS é hoje norma internacional e foi uma das grandes contribuições do projeto MAP, sendo constituído de um conjunto de serviços que permitem a comunicação nas aplicações industriais. A primeira proposta de normalização (RS-511) foi apresentada em 1985, e constituía-se de duas partes:

- Manufacturing Message Services [ISO188], que definia 84 (oitenta e quatro) serviços organizados em 9 (nove) classes distintas, sendo 3 (três) destes serviços não confirmados;
- Manufacturing Message Specification [ISO288], que especifica o protocolo utilizado.

O protocolo e os serviços oferecidos pelo MMS cobrem grande parte das necessidades de comunicação entre sistemas da produção e permitem a escrita de programas que acessam as primitivas de serviço, manipulando objetos virtuais que representam recursos reais de um equipamento de produção remoto.

Os processos de aplicação (APs - Application Processes) são os usuários dos serviços MMS, e executam-se num equipamento de produção ou estação de supervisão, utilizando um modelo de comunicação do tipo cliente-servidor entre dois APs.

O objeto principal definido no MMS é o dispositivo virtual de manufatura ou VMD (Virtual Manufacturing Device), que representa um equipamento ou uma classe de equipamentos de produção com as mesmas características, sendo que um processo de aplicação (AP) deve possuir pelo menos um objeto VMD. O principal componente de um VMD é a função executiva, que é a responsável pela gestão de acesso aos recursos do equipamento tais como processadores, memória, portas de entrada-saída e etc.

#### **2.4.1 - As Arquiteturas MAP-EPA e Mini-MAP.**

Apesar das vantagens apresentadas pela proposta MAP original, no sentido de possibilitar a interconexão entre os vários níveis da automação industrial, observou-se que esta

ainda apresentava-se inadequada para aquelas aplicações que exigiam tempos de resposta curtos, sendo mais apropriada para aplicações em níveis hierárquicos superiores. Este fato proporcionou a geração das versões MAP-EPA (Manufacturing Automation Protocol - Enhanced Performance Architecture) e Mini-MAP com uma arquitetura reduzida e com o objetivo de reduzir o "overhead" das camadas de protocolo [MAP87].

A primeira proposta de solução para adequar esta rede de comunicação às exigências de performance dos níveis inferiores constituiu-se na definição de uma versão simplificada da arquitetura MAP, a qual foi denominada MAP-EPA.

A arquitetura MAP-EPA foi baseada na definição de duas pilhas de camadas de protocolo: a primeira era a pilha normal com todas as camadas do MAP, e a segunda era uma pilha formada somente pelas camadas física, enlace e aplicação, ficando o sistema, aqui, desprovido dos serviços das demais camadas. Neste caso, o protocolo IEEE 802.4 continuou sendo adotado, agora, porém, sobre um suporte de transmissão em banda base e operando a 5 Mbit/s.

De acordo com esta arquitetura, um processo de aplicação pode optar por enviar seus dados através da pilha completa de camadas do MAP original ou através da pilha MAP-EPA, para os casos em que se tem como requisito um tempo de resposta rápido.

A segunda proposta de solução para a questão do elevado tempo de processamento do protocolo MAP, veio através da proposta de arquitetura Mini-MAP, que é composta unicamente da pilha simplificada de camadas do MAP-EPA.

Esta tinha o objetivo de suprir as aplicações de níveis inferiores da hierarquia fabril, permitindo a comunicação entre estações mais simples tais como sensores e atuadores inteligentes.

Enquanto que a proposta MAP original apresentava tempos de resposta (tempo entre a requisição e a obtenção de um dado remoto) da ordem de 500mS, as arquiteturas MAP-EPA e Mini-MAP permitiram uma redução deste tempo de resposta para cerca de 100mS. Como este

tempo de resposta ainda não é satisfatório para muitas aplicações industriais, partiu-se para a definição de um tipo de rede de comunicação de maior performance, denominado genericamente "Fieldbus".

## **2.5 - As Redes em Barramento de Campo ou "Fieldbus".**

Os grandes avanços na tecnologia digital conduziram a uma nova era dos componentes industriais do tipo sensores e atuadores, pelo fato deles agora poderem ser dotados de inteligência.

No sistema de controle clássico, inicialmente, a interconexão de sensores de campo com o computador central era feita de forma que os conversores A/D ficavam situados nesta estação central, onde multiplexadores e amplificadores de sinal ficavam incorporados a estes; neste caso, os sinais analógicos eram transmitidos a distância desde o sensor de campo até a central. Posteriormente, os amplificadores se deslocaram para o campo com o objetivo de reduzir a sensibilidade ao ruído, surgindo os sistemas de transmissão analógica por "loop" de corrente (0/4 a 20mA), e que, ainda hoje, são os mais utilizados.

A evolução mais recente avançou no sentido de digitalizar o sinal no sensor, agora inteligente, ao qual foram delegadas mais funções além da simples medida. Assim, observa-se que a multiplexação dos sinais é feita no próprio meio físico ou barramento, através de redes locais de comunicação, sendo esta a proposta das redes em barramento de campo ou "Fieldbus".

O barramento de campo (Fieldbus) visa substituir as ligações ponto-a-ponto analógicas de cada sensor/atuador por um barramento de sinal, digital, bidirecional e de acesso compartilhado [ISA191]. Os principais benefícios esperados com esta substituição são:

- redução drástica no custo de cabos e das interfaces;
- facilidades de instalação e manutenção do sistema;
- separação da instrumentação e do controle, de tal forma que a evolução tecnológica dos sensores não afete os equipamentos de controle;

- expansão fácil e mais rápida;
- diagnóstico e detecção automática de falhas;
- maior desempenho da transmissão digital em relação à analógica;
- possibilidade de deslocamento para o campo das funções de processamento prévio do sinal, etc.

Nos últimos anos, surgiram vários projetos de padronização dos sistemas Fieldbus a nível de organizações internacionais, entre os quais, o projeto PHOEBUS, executado por universidades suíças de 1985 a 1987; o projeto FIP (Factory Instrumentation Protocol), executado na França num esforço conjunto da indústria e de várias universidades; o Bitbus, lançado pela INTEL em 1984; o PROFIBUS, como um esforço combinado na Alemanha das empresas Bosch, Siemens, Klockner-Moeller e de várias universidades e instituições de pesquisa; a proposta CAN (Controller Area Network) da Bosch, INTEL e Philips e a proposta francesa VAN (Vehicle Area Network ), além de uma série de outras redes proprietárias. Mais recentemente a ISA (Instrument Society of America) vem trabalhando em uma norma americana para o Fieldbus (ISA/SP 50).

As próximas subseções serão destinadas ao estudo, de forma resumida, das arquiteturas, do protocolo e de alguns serviços oferecidos pelas principais propostas de Fieldbus existentes atualmente.

### **2.5.1 - A Proposta PROFIBUS.**

Para atender aos requisitos de tempo de resposta e satisfazer a uma arquitetura aberta, o PROFIBUS (PROcess Field BUS) implementa um modelo de referência OSI/ISO reduzido a três camadas: Física, Enlace de dados e Aplicação.

A primeira versão da norma baseia-se no padrão EIA-RS-485 (EIA - Electronic Industries Association), topologia barramento, meio par trançado blindado, e permite a interligação de até 32 elementos (estações ativas, passivas ou repetidoras) por segmento,

possibilitando até 4 segmentos. A codificação utilizada é a NRZ (Non Return to Zero), podendo ser implementada com uma USART simples (assíncrona). As taxas de transmissão suportadas são de 9.6, 19.2, 93.75, 187.5 e 500 Kbps. Para ambientes mais severos, existe uma versão que utiliza modulação FSK e previsão para utilização de fibras ópticas.

Consideram-se, na **camada de enlace**, também as duas funções separadas das subcamadas LLC (Logical Link Control) e MAC (Medium Access Control) propostas na norma IEEE 802. O controle de acesso ao meio (MAC), proposto pelo PROFIBUS, objetiva atender os principais requisitos de aplicações na manufatura e no controle de processos. Por um lado, deve permitir aos equipamentos inteligentes (CNC, CLPs, etc.) o direito de acesso ao meio físico compartilhado de forma determinística. Por outro, deve permitir a comunicação com os menores tempos de resposta possíveis, entre dispositivos de controle (CLPs) e dispositivos de campo mais simples (sensores e atuadores). Com esse objetivo, foi proposto o método de acesso "Token-Passing", também conhecido como mestre flutuante, em combinação com o procedimento mestre-escravos, resultando assim em um método híbrido.

O método Token-Passing é realizado pela circulação de um "token" em ordem sequencial de endereços entre as estações mestres. Esse token atribui à estação que o recebe o direito de utilizar o meio para execução de interações de transferência de dados com outras estações, por um período de tempo limitado. Após decorrido o período de retenção do token, ou não havendo mais interesse na utilização do meio, a estação retentora deverá passar o "token" a sua estação sucessora, formando assim um anel lógico [DIN188].

As estações escravas não tomam iniciativa de transmissão de mensagem, exceto quando requisitadas por alguma estação mestre. Além do controle de acesso ao meio, a camada de enlace de dados oferece os seguintes serviços de transferência de dados: SDA (Send Data with Acknowledge), SDN (Send Data with no Acknowledge), SRD (Send and Request Data with Reply) e CSRD (Cyclic Send and Request Data with Reply).

Os serviços acima são requisitados por estações mestre e respondidos por estações escravas ou mestres. Em adição a estes serviços, a camada de enlace de dados oferece ao usuário serviços de gerência:

- FMA (Fieldbus Management), que permitem, por exemplo, leitura e/ou escrita de variáveis;
- FDL (Fieldbus Data Link), proporciona a ativação/desativação de LSAP (Link Service Access Point) e notificação de eventos.

Uma das principais metas da **camada de aplicação** do PROFIBUS foi desenvolver uma arquitetura de comunicação considerando as limitações naturais de pequenos dispositivos e a possibilidade do uso de pontes (bridges) com redes MAP. Por isso, na camada de aplicação do PROFIBUS foi criado um subconjunto do protocolo ISO 9506 (MMS - Manufacturing Message Specification), adotado pelo padrão MAP. Nesta camada, três componentes são especificados [DIN288]:

- O protocolo de aplicação propriamente dito (FMS - Fieldbus Message Specification);
- A interface de mapeamento com a camada de enlace de dados (LLI - Lower Layer Interface);
- A interface com os processos de aplicação-APs (ALI - Application Layer Interface).

Um processo de aplicação (AP - Application Process) é um elemento que executa determinado processamento de informações no ambiente aberto. O modelo de comunicação PROFIBUS dá suporte ao modo de trabalho baseado em objetos. Neste, um AP trabalha com objetos processos (variáveis, programas, eventos, etc.), que contém atributos e descrições de operações sobre os objetos [Goed90]. Para que um AP possa interagir com um AP remoto, este deve mapear os objetos processos em objetos reconhecidos pelos serviços FMS, chamados de objetos de comunicação (objetos virtuais). O mapeamento dos objetos processos existentes

localmente em objetos comunicação é de responsabilidade da interface de camada de aplicação (ALI).

### 2.5.2 - A proposta FIP.

O FIP (Factory Instrumentation Protocol) é a proposta Francesa de Fieldbus, sendo atualmente norma nacional naquele país (UTE 46). Além disso, esta proposta é uma das que mais vem contribuindo para o desenvolvimento de um padrão internacional de redes Fieldbus nos seguintes órgãos: IEC (TC65C - WG6 ) e ISA/SP-50 (organização que a ANSI destinou para preparar a norma a ser usada nos USA), ISO (TC 184).

O sistema de comunicação é composto de uma entidade de comunicação descrita em três camadas, de acordo com o modelo de referência OSI/ISO. A descrição dos aspectos principais de cada uma das camadas será feita a seguir de acordo com [FIP88].

A principal função da **camada física** do FIP é difundir a informação através do meio (par trançado, par trançado blindado ou fibra óptica) para qualquer usuário participante do mesmo à taxas de transmissão de 31.25 Kbit/s, 1 e 2.5 Mbit/s [FIP93].

Os dados da informação que é transmitida são codificados em Manchester II, que tem a vantagem de transportar ao mesmo tempo o temporizador para sincronismo e os dados. A constituição do quadro não faz parte da camada física, entretanto, esta é responsável pela codificação e introdução de sinais de início e fim do mesmo. A camada física proporciona, ainda, mecanismos de redundância para segurança dos dados, em que a transmissão é feita simultaneamente nos dois suportes de comunicação, sendo que a estação receptora escolherá um deles para receber os dados.

A **camada de enlace** é responsável pela implementação dos serviços oferecidos à camada de aplicação com garantia. Para tanto, ela deve efetuar o *controle lógico do enlace* (LLC - Logical Link Control) e o *controle de acesso ao meio* (MAC - Medium Access Control). Entretanto, diferentemente do que ocorre na maioria das redes locais, no FIP não há uma distinção formal entre as duas subcamadas LLC e MAC.

O projeto FIP baseou-se no fato de que, nas redes locais industriais, uma informação gerada num determinado ponto pode interessar a várias outras estações. Por exemplo, o dado gerado por um sensor de temperatura pode interessar ao controlador, ao atuador e ao terminal de vídeo do operador, simultaneamente. Desta forma, e ainda para satisfazer às necessidades de modularidade e generalidade evolutiva conduzindo a definição de vários consumidores, o FIP foi construído sobre um modelo baseado no endereçamento por difusão ou broadcasting global (a informação transferida não necessita ter o endereço do destino). Por outro lado, o endereço de quem envia a informação é indicado como endereço fonte, que representa perfeitamente o nome do objeto indicado na aplicação.

Assim, toda informação, ao ser transmitida, deverá estar na forma de dois quadros sucessivos: o primeiro, sendo o quadro de identificação, e o segundo, sendo o quadro de dados contendo o valor do objeto identificado pelo quadro de identificação. Neste caso, o quadro de identificação representa o endereço fonte designando não somente a estação produtora, mas também, o tipo da informação a ser enviado pela estação.

O Fieldbus FIP não é baseado num protocolo de comunicação entre Processos de Aplicação (APs - Application Process), como em praticamente todas as demais LAN's propostas. Os APs não são endereçados, os objetos é quem são designados. Assim, devido a este fato, *FIP pode ser considerado não uma rede local, mas mais precisamente, um sistema para atualização e gerenciamento da base de dados distribuídos* [FIP93].

A emissão do nome ou quadro de identificação é feita pelo chamado *árbitro de barramento*, que, desta forma, exerce o controle de acesso ao barramento, caracterizando deste modo um controle centralizado. O árbitro do barramento transmite os nomes dos objetos para que os *produtores* possam enviar os valores disponíveis. Neste caso, para que os nomes possam ser enviados numa ordem apropriada, o árbitro deve ter uma lista organizada dos objetos.

A camada de enlace oferece um *serviço básico* SDN (Send Data with no Acknowledge) e um *serviço broadcasting* RDR (Request Data and Reply), sendo que ambos são dirigidos pelo árbitro do barramento.

A camada de enlace FIP funciona de acordo com o modelo produtor-consumidor, sendo que qualquer entidade de enlace baseia-se nos seguintes mecanismos:

- Atualização de dados cíclicos (obrigatório);
- Transmissão de mensagens, que são indispensáveis no carregamento de programas para os dispositivos (opcional);
- Atualização de dados não-periódicos (opcional).

O controle de fluxo na transferência de dados (cíclica ou acíclica) é realizado em tempo de configuração, respeitando-se as restrições de janelas de tempo, espaço de memória colocado e número de transmissões não periódicos autorizadas por ciclo de árbitros do barramento, e os mecanismos para a detecção de perda de quadros são feitos com uso de temporizadores.

Para concluir, é importante observar que o FIP tem um mecanismo de proteção (Protocolo de Introdução) dando garantias de que uma entidade de comunicação inserida no sistema não participará das trocas de dados (cíclicos ou acíclicos) antes de checar a consistência da sua base de dados em relação à base de dados distribuída.

A **camada de aplicação** tem por função oferecer um conjunto de serviços aos processos de aplicação (APs - Application Process), permitindo a leitura e escrita de valores de variáveis. O mecanismo básico é o estabelecimento de ligações entre um produtor de dados e os usuários destes dados, isto é, um conjunto de dados tem sempre um único produtor, mas pode ter um ou vários consumidores.

Os processos de aplicação (APs) de uma aplicação distribuída possuem, no nível da entidade de comunicação, uma imagem local das variáveis do sistema de produção. Assim, usando os serviços de escrita e leitura local pode-se manipular estas imagens locais.

O mecanismo de leitura e escrita local não envolve informações trocadas entre entidades conectadas no barramento, mas somente entre entidades da camada de aplicação de

uma única entidade de comunicação. O valor consumido em uma leitura local será uma saída da última atualização feita pela *função de transferência*. O valor produzido em uma escrita local é avaliado pelo sistema de comunicação do distribuidor que irá difundí-lo para todos os seus usuários. Desta forma, observa-se que leituras e escritas locais são mecanismos independentes de atividade na rede.

O mecanismo de escrita remota é baseado no mesmo princípio. A única diferença, neste caso, é que o produtor inicia a distribuição. Assim, através dos serviços de indicação, os processos de aplicação podem verificar o próprio funcionamento da entidade de comunicação, e também sincronizarem-se através da recepção de variáveis de sincronização. Estados associados com a troca de variáveis dão informações, restauração e prontidão ao usuário sobre a validade do dado produzido e consumido.

*Serviços de Sincronização* são necessários, visto que os processos que compõem a camada de aplicação podem ser síncronos (cuja execução está associada com a indicação de recepção da rede) ou assíncronos (cuja execução é independente da rede). Certos processos de aplicação somente admitem o modo de funcionamento assíncrono; assim, um mecanismo de resincronização permite que estes participem da aplicação sincronizada distribuída.

Opcionalmente, um status de consistência espacial para uma lista de variáveis pode ser elaborado na camada de aplicação. Este status indicará, quando for verdadeiro (TRUE), que todas as variáveis da lista consumidas por vários usuários são idênticas. Este mecanismo é baseado na difusão (broadcasting) de uma variável consistente para todas as entidades consumidoras.

O **gerenciamento da rede** ajuda a satisfazer vários objetivos que são também sucessivos no ciclo de vida da rede. Primeiramente, para iniciar a rede é necessário:

- a configuração, que inclui a definição de parâmetros, identificadores, objetos, etc.
- a implementação e o teste feito progressivamente aos dispositivos a serem adicionados na rede, tais como: teste de funcionamento, checagem dos modos de operação da rede, etc.

Com a rede em operação, é necessário a sua manutenção, bem como a dos seus subscritores.

Cada camada é modelada por objetos, como descrito anteriormente. Estes objetos são agrupados juntos de acordo com as funções que suportam (MPS objetos de aplicação, MMS objetos de aplicação, etc.). Esta estrutura é também aplicada nas entidades de gerenciamento de rede.

O gerenciamento da camada de enlace de dados é feito através de serviços que tornam possível criar a *lista de identificadores* para serem reconhecidos na produção ou recepção para uma estação ordinária. Esses serviços, quando se tratar do árbitro do barramento, devem possibilitar a criação da lista de identificadores, que levará o mesmo direto ao modo de operação.

O gerenciamento da camada física é muito simples. Sua ajuda é no sentido de prover os testes da camada física ou para gerenciar a redundância da mesma.

O gerenciamento do sistema é necessário para configurar uma estação remotamente; ele é necessário para definir mensagens universais reconhecidas por uma estação sem uma configuração.

### **2.5.3 - A proposta ISA/SP-50.**

ISA/SP-50 (Instrument Society of America/Standards and Practices 50) constitui a proposta norte-americana para o Fieldbus e, provavelmente, será a futura norma internacional para o mesmo a ser elaborada pelo IEC (International Electrotechnical Commission). Ela apresenta uma arquitetura baseada no modelo de referência OSI/ISO e é composta das camadas física, enlace de dados, aplicação e usuário da rede.

A **camada física** é responsável diretamente pela transmissão dos dados a nível de bits e deve garantir a integridade dos dados e a interoperabilidade entre dispositivos a nível

físico. Foram definidos dois níveis de camada física de acordo com os requisitos exigidos pelo barramento de campo:

- H1, usado em controle de processos tradicionais de baixa velocidade (31,25 Kbps), usando como meio o par trançado e satisfazendo os requisitos de segurança intrínseca e alimentação nos mesmos fios, suportando as topologias em estrela e barramento sem redundância [ISA190].
- H2, usado em controle de processos de alta velocidade (1 Mbps e 2,5 Mbps), tendo como meio o par trançado blindado com distâncias máximas de 700 m para o barramento e, no máximo, 30 estações interligadas com possibilidade de alimentação via barramento.

A camada física recebe unidades de dados da camada de enlace de dados, adiciona preâmbulos e delimitadores, providencia a codificação (Manchester II) e transmite o sinal resultante sobre o meio físico através de um nó. As Interfaces Data Units (Ph-IDU) devem ser transferidas entre as camadas física e de enlace de acordo com as requisições da ISO 7498.

A interface camada física-gerenciamento de estação providencia serviços que não são tratados pelos canais normais das camadas superiores, tais como início e seleção de opções.

Os princípios básicos da **camada de enlace** seguem aqueles do FIP para os casos de comunicação crítica no tempo, entretanto, alguns princípios operacionais do PROFIBUS, como o "token-passing" também foram adotados [ISA291, ISA391].

As estações (entidades de comunicação) conectadas no barramento são divididas em três classes: básicas, mestre-de-enlace e bridge.

Estações Básicas são aquelas estações que possuem um conjunto de serviços básicos, por exemplo, um sensor, um atuador, etc., e possuem os elementos de protocolos necessários para prover interoperabilidade ao responderem DLPDUs, iniciar, ressincronizar e terminar DLCs com um par, enviar e receber DLSDUs e pedir o direito de transferência a estação LAS (Link Active Scheduler).

Mestre-de-enlace (LM - Link Master) são todas as estações capazes de se apoderar do meio e de cooperar com os seus pares, sem necessidade de escalonamento prévio. O direito de acesso ao meio é feito através do "token", e elas têm elementos de protocolos para detectar a ausência do LAS no enlace e acionar esta função em seu nodo, manter um acesso ordenado ao recurso compartilhado de comunicação de enlace e servir como fonte de tempo interno para outras DLEs (Data Link Entities).

Bridge são estações com as mesmas funções das classes anteriores e ainda capazes de interligarem entidades de enlace diferentes.

Durante a operação, uma entidade de comunicação do tipo LM passará a exercer funções especiais de escalonamento, assumindo o papel de um Escalonador de Enlace (LAS-Link Active Scheduler), sendo a LAS responsável pela coordenação de funções críticas no tempo das entidades de comunicação básicas.

A transmissão é feita tendo-se em conta três tipos de "token":

- "Token de escalonamento", cuja posse é da entidade LAS (esse "token", no início da operação, é disputado por todas LM, sendo que somente uma o assume em definitivo);
- "Token circulado", que é distribuído pela LAS entre as LMs, observando-se diversos aspectos de temporização, formando, assim, um anel lógico e possibilitando as LMs assumirem funções de transferência sem o controle da LAS;
- "Token delegado" é enviado pela LAS a qualquer entidade do barramento (estação), em particular as básicas, por solicitação das mesmas ou sempre que nelas se proceda os serviços de comunicação escalonados pela LAS.

A **camada de aplicação** do ISA/SP 50, em função da grande diversidade de variáveis e algoritmos manipulados, adotou o paradigma de especificação orientada a objetos (OOD - Object Oriented Design), podendo, assim, definir um objeto como sendo uma coleção de seus dados, ações, comportamento e de seus relacionamentos com outros objetos [Mende91].

A camada de aplicação, propriamente dita, procurou conjugar as idéias básicas do protocolo MMS (Manufacturing Message Specification) em aplicações sem restrições temporais, com serviços novos Read/Write inspirados no FIP e que atendem o tráfego cíclico e acíclico críticos no tempo ("time critical").

As relações de comunicação entre as entidades de aplicação (AEs - Application Entities) que cooperam na realização de troca de informações são representadas pelas associações de aplicação. Estas associações podem ter diversos tipos e atributos, que deverão ser levados em consideração no mapeamento para os serviços da camada de enlace de dados. Basicamente, são consideradas duas famílias de relações: Cliente-Servidor e Produtor-Distribuidor-Consumidor. Além disso, as relações de comunicação podem ter diversos atributos: ponto-a-ponto (relação simétrica), broadcast ou multicast com relações assimétricas onde uma envia para todas ou para algumas, cíclicas ou acíclicas, buffered/unbuffered, onde a mensagem pode ser armazenada após a transmissão por algum tempo.

A **camada do usuário** situa-se acima da camada de aplicação e destina-se a aliviar o programador de detalhes referentes ao acesso do sistema de comunicação. Ela oferecerá serviços adequados a diversos e diferentes tipos de aplicações. Os trabalhos atuais encontram-se restritos à definição de funções para aplicações em controle de processos através da PCUL (Process Control User Layer), porém, outros trabalhos deverão atender as demais áreas de automação da manufatura, controle predial, eletrônica embarcada e etc.

#### **2.5.4 - A Rede Bitbus.**

O Bitbus é uma rede desenvolvida pela INTEL a partir do ano de 1984, objetivando a integração de sensores, atuadores, controladores e instrumentos de medição do nível mais baixo da hierarquia fabril. Ela é uma rede com topologia em barramento e seu protocolo de acesso ao meio é baseado no mestre-escravos. Sua arquitetura é composta de três camadas, como as demais redes apresentadas [Bitbu87]. Além disso, ela é um forte concorrente comercial, inclusive pela grande disponibilidade de componentes integrados disponíveis às implementações propostas para padronizar o "Fieldbus".

A **camada física** utiliza a interface EIA/RS-485 e usa como meio físico o par trançado, podendo atingir taxas de transmissão, no modo síncrono, de até 2,4 Mbit/s.

O protocolo SDLC (Synchronous Data Link and Control), um sub-conjunto do protocolo HDLC (High Level Data Link and Control), implementado a nível de hardware pelos processadores 8044 e 8744 da INTEL, é utilizado para a **camada de enlace**, e a nível da camada de aplicação foram definidos uma série de serviços denominados RAC (Remote Access and Control) para implementação da mesma.

### **2.5.5 - A proposta CAN (Controller Area Network).**

Esta é uma rede de comunicação serial multimestre desenvolvida pela empresa BOSCH há alguns anos objetivando a conexão de módulos de controle, sensores e atuadores dentro de automóveis (eletrônica embarcada). Sua estrutura em camadas, num número de três (camada física, enlace de dados e aplicação), é implementada de forma que as camadas 1 e 2 do modelo OSI são baseadas na especificação de protocolo CAN (CAN Protocol Specification), sendo que a camada de aplicação não possui ainda um protocolo específico, estando em fase de estudos por um grupo de usuários da manufatura denominado CiA (CAN in AUTOMATION e. V.) uma proposta para esta camada [Reuss93].

A **camada física**, por sua vez, pode ser implementada segundo as normas ISO/DIS 11898 e 11519-1, que são baseadas na interface EIA/RS 485, onde a primeira permite taxas de transmissão de 125 Kbit/s até 1 Mbit/s para um comprimento de barramento de até 40 m, e a segunda permite uma taxa de transmissão de até 125 Kbit/s para um barramento de até 1000 m de comprimento, num meio físico do tipo par trançado blindado, sendo também disponível a fibra óptica em estrela passiva como meio de transmissão. Os bits são codificados segundo a técnica NRZ com bitstuffing.

A **camada de enlace** tem o seu protocolo baseado nas normas CAN (CAN Standards) que permite a configuração multimestre. A troca de dados tem como mecanismo principal o multicasting e o broadcasting que ocorre através de uma transmissão orientada a

objeto, onde se pode endereçar 2032 diferentes tipos de mensagens através dos 11 bits do campo identificador do "frame". Além disso, o método de acesso CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) é determinístico, eficiente e bastante atual para redes de comunicação industriais [Winki92].

Neste caso, as mensagens, com tamanho limitado a 8 (oito) bytes de dados, ao serem codificadas, são encapsuladas de tal forma que um campo especial, denominado identificador, contendo 11 bits destinados ao nome e a prioridade da mensagem e um bit responsável por arbitrar a prioridade das mensagens em caso de colisão. Se ele possuir um valor 1 (um) é chamado de recessivo, e se for 0 (zero), será dominante; assim, na ocorrência de colisão, o bit um escreverá sobre o bit zero e este dará o direito de transmissão àquela estação cuja mensagem ele fazia parte.

A **camada de aplicação** proposta pela CiA possui três partes: o gerenciamento da rede (NMT - Network Management) que é responsável pela inicialização da rede e pelo tratamento de erros do sistema; um subconjunto do MMS (CMS - CAN Message Specification) que contém alguns serviços tais como, "define, read and write of variables, domains and events"; e um bloco distribuidor (DBT - DisTriButor) com características especiais para providenciar a distribuição dinâmica dos nomes definidos pelo usuário para identificadores de mensagens reais.

A rede CAN possui hoje uma série de trabalhos publicados referentes às aplicações em automação da manufatura, notadamente na Alemanha. Estes trabalhos apresentam resultados que são encorajadores em aplicações de tempo real.

Além disso, existe uma série de implementações em hardware já disponível como produtos comerciais para a camada física (transceptor) e para o protocolo de enlace, destacando-se, neste ponto, a interface sensora/atuadora (SLIO) 82C150, o transceptor PCA82C250, que é compatível com a interface ISO/DIS-11898, o BasicCAN-82C900, que implementa a camada de enlace e microcontroladores de comunicação 87C592 e 82CE598 da família 80C51, todos da Philips. Além destes, têm-se ainda os FullCAN82526 e ExtendedCAN82527 da Intel, os

68HC05x4 e 68HC05x16 com arquitetura Motorola e o ExtendedCAN72005 da NEC, que implementam a camada de enlace.

Concluindo esta seção, é importante salientar que existe ainda uma série de redes destinadas a atender aplicações a nível de "Fieldbus", entre as quais podem ser citadas: a rede SERCOS (SErial Real time COmmunication System), com topologia em anel, permitindo até 30 m de comprimento, podendo operar a uma taxa de até 4 Mbit/s e que se propõe a atender aplicações em máquinas de comando numérico e em robótica [Winki92]; a rede VAN (Vehicle Area Network), uma proposta desenvolvida na França e a rede J1850, uma proposta desenvolvida no USA. Ambas, juntamente com CAN, são candidatas em potencial, atualmente, a uma padronização de rede de comunicação para a indústria automotiva.

## 2.6 - Tendências de padronização de rede "Fieldbus".

A seção anterior apresentou uma série de redes de comunicação que se propõem a atender as necessidades e requisitos impostos pelas aplicações do "Fieldbus". Diversos fabricantes apresentam sistemas de comunicação com este fim. Entretanto, isto provoca, por um lado, uma gama de arquiteturas tão distintas que o usuário de um desses sistemas fica dependendo exclusivamente dos serviços e instrumentos de campo fornecidos unicamente por um fabricante, além, é claro, de tornarem as possibilidades de hierarquizar os diversos níveis de comunicação fabris cada vez mais distantes.

Em função disso, há hoje um esforço internacional no sentido de se buscar uma norma universalmente aceita para o "Fieldbus", e, neste caso, procura-se por um sistema que implemente o modelo OSI/ISO reduzido, para manter a compatibilidade com sistema MAP e que permita atingir os três níveis definidos de padronização:

- *Interconectividade*, para possibilitar a troca de mensagens entre usuários.
- *Interoperabilidade*, possibilitando a interpretação das informações pela entidade destino sem a necessidade de tradução de uma linguagem particular.

- *Intercambialidade*, que é a possibilidade de trocar um dispositivo por outro que desempenha a mesma função, embora possa ser de outro fabricante.

Entre aqueles sistemas apresentados na seção anterior, para o nível de "chão de fábrica", os que possuem características que mais se aproximam do perfil traçado para um padrão internacional, por possuírem compatibilidade, são as propostas PROFIBUS, FIP e ISA-SP 50, sendo, inclusive, as que apresentaram, e ainda estão apresentando no caso da última, as maiores contribuições para a elaboração do padrão a cargo da comissão SC65C/WG6 do IEC (International Electrotechnical Commission). A norma americana ISA/SP 50 é, hoje, a proposta que mais se aproxima da futura norma internacional.

## **2.7 - Aplicações de Tempo Real: nível hierárquico de componente.**

As soluções desejadas de comunicação para o nível de componente devem ser de baixo custo e possuírem o menor "overhead" possível para satisfazer as aplicações críticas no tempo. Em consequência disso, apesar dos esforços feitos, os padrões em banda base do MAP (MAP-EPA e Mini-MAP) não são os mais convenientes para este fim, visto que o **tempo de resposta** (tempo decorrido entre o envio de requisição de dados por uma estação a outra estação e a recepção completa do mesmo) está compreendido entre 100 e 500mS [Stemm91], valores estes muito acima dos períodos de amostragens típicos exigidos para o controle de grandezas da automação da manufatura, como será demonstrado no capítulo seguinte.

Os sistemas "Fieldbus", por sua vez, apresentam tempos de respostas bem mais reduzidos e, em alguns casos, possuem serviços capazes de satisfazerem algumas aplicações da automação da manufatura. Dessa forma, observa-se, por exemplo, a nível da camada de enlace, que os serviços confirmados (SDA - Send Data with Acknowledge e SRD - Send and Request Data with Reply) e o não confirmado (SDN - Send Data with No Acknowledge) do PROFIBUS, apresentam tempos de resposta da ordem de 10 mS e 4.5 mS, respectivamente. Já o serviço não confirmado (SDN - Send Data with No Acknowledge) do FIP, operando a uma velocidade de 1Mbit/s, é capaz de coletar 128 valores provenientes de sensores analógicos e transmiti-los em 22 mS, oferecendo assim um tempo de resposta da ordem de 0.172 mS [FIP93].

Entretanto, estes tempos de resposta, dependendo do tipo de serviço requerido pela aplicação, quando duplicados para satisfazer a condição de malha fechada sensor-controlador-atuador, ainda são bem superiores aos tempos requisitados no controle de grandezas importantes da automação da manufatura, tais como velocidade, aceleração, posição de eixos, torque de eixos e força, que podem requerer períodos de amostragens da ordem de 1 mS. Acrescente-se a isso o fato de que o controle via rede para uma única grandeza não tem sentido do ponto de vista de conectividade, integração e econômico, uma vez que o objetivo a ser atingido nestes casos é, em geral, o controle multimalhas.

Sendo assim, muito provavelmente, o futuro padrão de redes Fieldbus, que apresenta hoje características dos dois padrões apresentados acima (FIP e PROFIBUS), não permitirá atender uma série de aplicações que envolvam tais grandezas. Neste caso, abre-se um espaço para outras soluções, tais como as redes CAN, VAN e SERCOS, que não possuem, em geral, compatibilidade com o MMS do MAP e, às vezes, nem possuem uma estrutura com algum tipo de protocolo do modelo OSI/ISO. No caso específico de CAN, dependendo da implementação, observa-se a possibilidade de se obter tempos de resposta menores que 0.134 mS para uma taxa de transmissão de 1 Mbit/s [Etseh92, Reuss93].

O próximo capítulo destina-se a analisar o comportamento das principais grandezas a serem controladas, os critérios de escolha dos seus períodos de amostragens, além de apresentar o projeto de controladores e justificativas matemáticas para a degradação do controle, em casos de perdas de mensagens na rede de comunicação.

# CAPÍTULO III

## DINÂMICA DAS PRINCIPAIS GRANDEZAS DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

### 3.1 - Introdução.

Os sistemas de produção podem ser contínuos, caracterizados principalmente pela presença de processos unitários, ou discretos, onde os produtos constituem unidades isoladas e são caracterizados pelos sistemas de manufatura. A automação de ambos os tipos de sistemas produtivos requer, ente outras coisas, o desenvolvimento de controladores industriais. No entanto, os requisitos de tempo das grandezas envolvidas (ordem de grandeza, periodicidade, etc), relacionados com a amostragem discreta e periódica, são distintos para os dois casos. De maneira geral, as grandezas dos sistemas contínuos (nível, vazão, pressão, temperatura, etc) apresentam uma baixa dinâmica quando comparadas com aquelas da automação da manufatura (controle batch, comando e acionamento de motores, servomecanismos em máquinas ferramenta, fins de curso, alarmes, etc).

As próximas seções deste capítulo serão destinados à análise do comportamento dinâmico de algumas grandezas típicas dos processos contínuos e da automação da manufatura, sendo que, no último caso, as considerações serão voltadas mais para grandezas cujo controle exige o uso de servomotores ou motores DC na sua malha de controle. O objetivo principal deste estudo é o de se obter subsídios para uma escolha adequada do período de amostragem, que é de fundamental importância para a operação conveniente da *rede de comunicação* a ser escolhida para se fechar a malha de controle.

Nas duas últimas seções deste capítulo, serão apresentados o perfil da rede de comunicação a ser usada como suporte de transmissão para controle destas grandezas, o projeto e implementação prática de um controlador de posição com um algoritmo PID, em que se

contempla os critérios de escolha do período de amostragem considerando-se a dinâmica desejada para o sistema em malha fechada e a possibilidade do uso da rede local de comunicação com suas características e restrições temporais, e, finalmente, é tratada a questão do efeito degradante do controle quando ocorrem perdas de mensagens na rede de comunicação.

### **3.2 - Dinâmica do Controle de Processos com Variáveis Amostradas.**

Os processos contínuos podem ser controlados de forma analógica ou digital. No segundo caso, o algoritmo de controle é todo implementado em software, implicando na necessidade de se obter o modelo matemático discretizado do processo. Na discretização do modelo deve-se levar em conta a ordem do sustentador (holder) e o período de amostragem escolhido.

A escolha do sustentador está associada diretamente com o tipo de referência a ser seguida pela saída sobre os instantes de amostragens e fora deles, e, também, com o tipo de perturbação a ser rejeitada, isto no caso de se utilizar controladores convencionais do tipo PI ou PID. As constantes de tempo do processo, em especial as constantes de tempo dominantes, são as responsáveis pela dinâmica do mesmo, e têm uma importância fundamental na escolha do período de amostragem.

#### **3.2.1 - Sistemas de nível e vazão de líquidos.**

A análise de sistemas que envolvem fluxos de fluidos é possível desde que se possa distinguir entre regime de fluxo laminar e turbulento. Isto é feito através do valor assumido pelo *número de Reynolds*, que indica um fluxo laminar se menor que 2000, e turbulento se compreendido entre 3000 e 4000, aproximadamente.

Sistemas laminares podem ser modelados de forma linear, enquanto que turbulentos são não-lineares (processos industriais, por envolverem quase sempre fluxos através de tanques e tubulações, têm regime de fluxo turbulento).

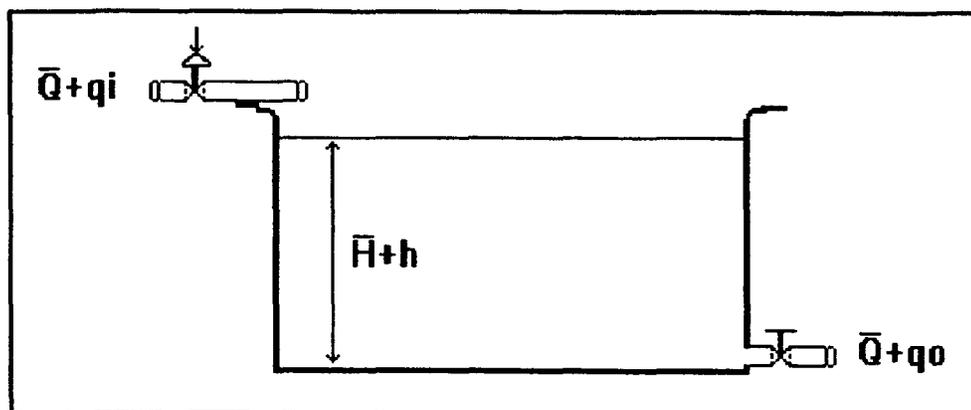


Figura 3.1 - Sistema de nível de líquido

A função de transferência do sistema obtida, após processada a linearização em torno do ponto de equilíbrio e considerando a vazão como entrada e a altura do nível como saída, é dada por:

$$\frac{\hat{H}(s)}{\hat{Q}_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (3.3)$$

Se o objetivo agora for controlar a vazão de saída, a nova função de transferência será:

$$\frac{\hat{Q}_o(s)}{\hat{Q}_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (3.4)$$

onde, nos dois casos, o produto  $RC$  representa a constante de tempo do sistema. Observa-se, ainda, que o sistema comporta-se como de primeira ordem.

### 3.2.2 - Sistemas de Pressão.

Os conceitos de resistência e capacitância são novamente empregados neste caso e suas definições são similares ao caso anterior, exceto que agora temos pressão, vazão e massa específica como grandezas envolvidas.

A figura 3.2 apresenta um sistema de pressão para análise, onde  $\bar{P}$  é a pressão em regime estacionário,  $p_i$  e  $p_o$  são pequenas variações nas pressões de entrada e de saída,  $q$  é a vazão de entrada,  $R$  e  $C$  são a resistência e a capacitância do sistema, respectivamente.

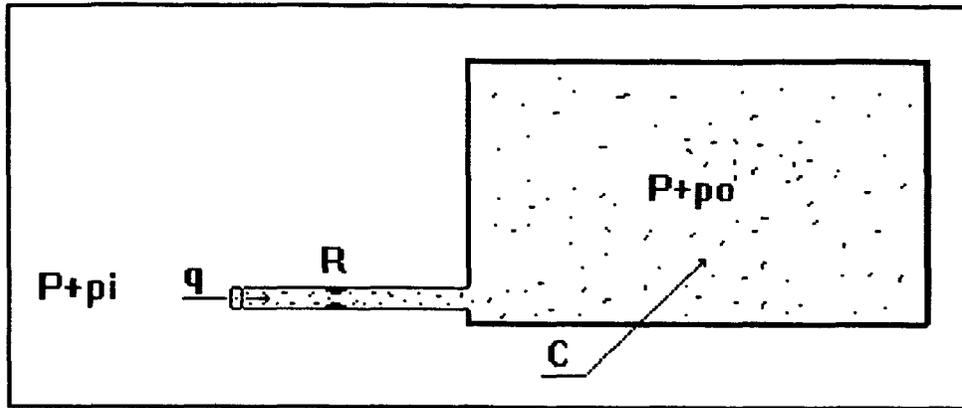


Figura 3.2 - Sistema de pressão

Para pequenas variações na diferença de pressão e no fluxo do gás, a resistência e a capacitância podem ser consideradas constantes, e a função de transferência do sistema, após os procedimentos de linearização, será dada por:

$$\frac{\hat{P}_o(s)}{\hat{P}_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (3.5)$$

onde observa-se um sistema de primeira ordem, com o produto  $RC$  representando a constante de tempo do sistema.

### 3.2.3 - Sistemas Térmicos.

O conceito de resistência térmica está associado com o tipo de transferência de calor (condução, convecção ou radiação), e o de capacitância térmica com o calor específico da substância, sendo ambas definidas como:

$$R = \frac{d(\Delta\Theta)}{dq} \text{ e } C = M \cdot c_p \quad (3.6)$$

onde,  $\Delta\Theta$  é a variação de temperatura,  $dq$  é a variação na taxa de fluxo de calor,  $M$  é a massa da substância considerada, e  $c_p$  é o calor específico da substância.

Se a temperatura do líquido que entra no recipiente da figura 3.3 for mantida constante, e a taxa de entrada de calor sofrer uma variação súbita de  $\bar{H}$  para  $\bar{H} + h_i$ , então a taxa de saída de calor irá variar desde  $\bar{H}$  até  $\bar{H} + h_o$ , a temperatura do líquido que sai também variará desde  $\Theta_o$  até  $\Theta_o + \theta$ .

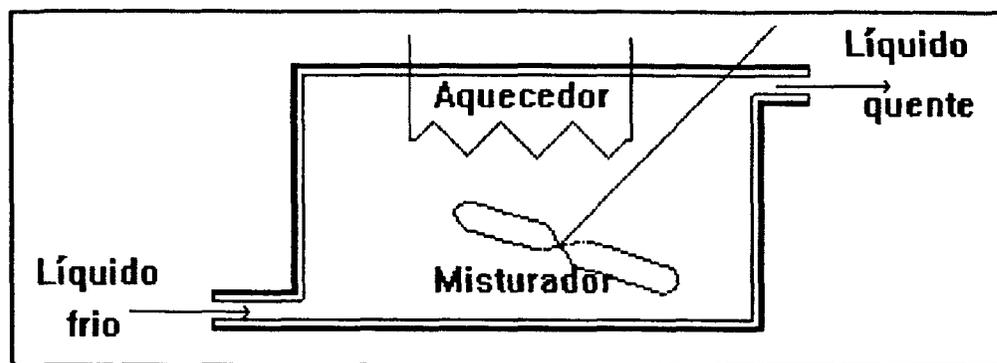


Figura 3.3 - Sistema térmico

Neste caso, supondo que a temperatura do líquido se mantenha constante, a função de transferência do sistema, após simplificações e linearização, será dada por:

$$\frac{\hat{\Theta}(s)}{\hat{H}_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (3.7)$$

Se, por outro lado, a temperatura do líquido na entrada estiver sujeita a variações (caso mais comum na prática), e a temperatura do líquido que sai deve ser mantida constante, então teremos a seguinte função de transferência:

$$\frac{\hat{\Theta}(s)}{\hat{\Theta}_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (3.8)$$

Observa-se, aqui, que a função de transferência obtida para os dois casos representa um sistema de primeira ordem, e que a constante de tempo do sistema é, outra vez, dada pelo produto  $RC$  que aparece no seu denominador. Além disso, como será apresentado em uma seção posterior, as grandezas do controle de processo são tais que apresentam baixas dinâmicas, não impondo altas restrições temporais ao computador de controle.

### **3.3 - Dinâmica de Grandezas da Automação da Manufatura.**

O controle de grandezas típicas da manufatura, tais como *velocidade, posição, aceleração, torque, força e potência*, muito comuns em máquinas ferramenta, é feito com o uso de servomotores do tipo AC ou DC, sendo que estes últimos podem ser ainda rotativos ou lineares.

Servomotores, são assim denominados os motores desenvolvidos especialmente para uso em servomecanismos, construídos para pequenas potências, sendo que para níveis de potência mais elevado são usados motores convencionais. Nas próximas seções, será estudado o comportamento dinâmico das grandezas citadas acima, tendo-se em conta o uso de servomotores e motores DC controlados por armadura.

Os motores DC podem ser conectados à fonte de alimentação de três formas distintas no que diz respeito às alimentações da armadura e do enrolamento de campo: excitação série, paralela e independente. Cada uma delas oferece uma determinada característica de torque e potência em função da velocidade. Entretanto, pelo fato das duas primeiras apresentarem características não-lineares, em sistemas de controle usa-se, de forma generalizada, a excitação independente. Esse tipo de excitação, dependendo dos terminais onde se aplica a ação de controle, pode permitir dois tipos de controle: por armadura (campo fixo) e por campo (armadura fixa).

#### **3.3.1 - Funções de Transferências do Motor DC para Posição, Velocidade, Aceleração, Torque e Potência.**

As equações dinâmicas para o motor DC controlado por armadura são necessárias para se obter as funções de transferências das variáveis a serem controladas. A aplicação da transformada de Laplace a essas equações, considerando condições iniciais nulas, resultará, após algumas substituições e simplificações, na seguinte função de transferência entre a posição angular do eixo e a tensão aplicada na armadura do motor:

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s[L_a.J.s^2 + (J.R_a + f.L_a)s + R_a.f + K.K_b]} \quad (3.9)$$

onde  $L_a$ ,  $R_a$ ,  $K$  e  $K_b$  são a indutância, a resistência da armadura do motor, a constante de proporcionalidade do campo e da força eletromotriz, respectivamente. Além disso, temos ainda que  $\Theta$  é a posição angular do eixo do motor, e

$$J = J_m + n^2 J_l, \quad f = f_m + n^2 f_l \quad \text{e} \quad n = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.10)$$

são, respectivamente, o momento de inércia, o coeficiente de fricção viscosa equivalentes do motor e da carga quando referidas ao eixo do motor, e a relação de engrenagens que efetuam o acoplamento entre a carga e o eixo do motor.

Na grande maioria de casos práticos, a indutância do motor ( $L_a$ ) é pequena e pode ser desprezada e, neste caso, teremos:

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m.s + 1)} = G(s) \quad (3.11)$$

onde  $K_m = \frac{K}{R_a.f + K.K_b}$  e  $T_m = \frac{R_a.J}{(R_a.f + K.K_b)}$  são o ganho e a constante de tempo mecânica do sistema, respectivamente.

Desta forma, de acordo com [Ogata70], as funções de transferências para todas as demais grandezas (velocidade, aceleração, torque e potência) poderão ser expressas de forma semelhante à equação 3.11.

É importante observar que, nos casos em que a carga e a relação entre o número de engrenagens de acoplamento são pequenas (por exemplo,  $n \leq \frac{1}{40}$ ), a constante de tempo do sistema pode ser estimada tendo-se em conta somente os parâmetros do motor, desprezando-se o efeito da carga ao ser refletida para o eixo do motor. Isto permite que seja estimado a ordem de grandeza da mesma para o pior caso, quando se objetiva utilizar uma rede de comunicação na malha de controle, o que corresponderia à própria constante de tempo do motor.

### 3.4 - Escolha do Período de Amostragem em Função dos Parâmetros do Sistema.

A dinâmica de uma grandeza a ser controlada depende exclusivamente dos parâmetros envolvidos no modelamento do processo. Portanto, quando se pretende utilizar um algoritmo de controle digital, o modelamento do processo é fundamental pois possibilitará a discretização do mesmo.

As técnicas utilizadas na discretização envolvem conhecimentos da transformada Z e de suas propriedades, além da escolha de um período de amostragem apropriado. Em relação a esta escolha, pode-se dizer que um controlador projetado para um determinado valor do período de amostragem não terá a mesma performance se houver necessidade de alteração naquele valor, mesmo que esta seja pequena, sendo que, na maioria dos casos, há necessidade de um novo projeto quando se altera o período de amostragem.

Sendo assim, a pergunta que deve ser feita neste ponto é: "que critérios existem e que parâmetros devem ser levados em consideração para se escolher o período de amostragem?" A resposta a esta questão não é imediata e nem tão simples como pode parecer, ela depende de uma série de fatores, entre os quais estão:

- a observação feita ao longo de vários anos e a experiência obtida sobre o funcionamento do sistema;
- a constante de tempo dominante ou a frequência amortecida do sistema em malha aberta;
- o tempo de subida ou a banda passante especificados para o sistema em malha fechada [Astro90], sendo que esta última é atualmente preferida em relação as outras.

Em relação ao critério prático, uma estimativa inicial proposta por vários autores, para controle de processo de baixa dinâmica, tais como: nível ou vazão, pressão e temperatura, sugere que os períodos de amostragens sejam de 1, 5 e 20 segundos, respectivamente, ignorando, neste caso, a dinâmica do processo completamente [Sebor89]. É exatamente com base neste fato que muitos dos controladores discretos comerciais para aplicação em controle de processo

adotam, genericamente, como período de amostragem 100 mS, objetivando atender a todos as aplicações neste campo, e ainda tornar sua operação transparente do ponto de vista do operador quando comparado com os controladores contínuos, com os quais o mesmo estava acostumado a operar.

Por outro lado, se a escolha for baseada nas características do sistema em malha aberta, duas possibilidades existem para a mesma. Num primeiro critério, o período de amostragem deverá estar compreendido entre 1/10 a 1/5 da constante de tempo dominante do sistema, isto é:

$$T = \frac{\tau_{max}}{5.a.10} \quad (3.12)$$

e, em um segundo critério, se o sistema for oscilatório, então  $T$  deve ser dado como uma função da frequência amortecida do sistema ( $\omega\rho$ ) por:

$$T = \frac{2\Pi}{(8.a.16).\omega\rho} \quad (3.13)$$

Considerando, agora, que a escolha seja feita tendo-se em conta as especificações desejadas para o sistema em malha fechada, tem-se outros dois critérios de escolha:

- o período de amostragem deve ser de 1/6 a 1/4 do tempo de subida (tempo em que a resposta varia de 10% a 90% do seu valor final), isto é:

$$T = \frac{t_s}{6.a.4} \quad (3.14)$$

- ou, ele deve ser dado como uma função da banda passante (frequência em que, no diagrama de Bode do módulo da função de transferência em malha fechada, o sinal cai em 3 dB) por:

$$T = \frac{2\Pi}{(6.a.10).\omega_{3dB}} \quad (3.15)$$

O critério de escolha de  $T$ , tendo-se em conta especificações de malha fechada, justifica-se pelo fato de que os processos são razoavelmente passa-baixas, a experiência mostra

que as frequências que interessam para implementação do controle estão abaixo da frequência da banda passante e, em geral, em malha fechada, exige-se uma dinâmica mais rápida do sistema que em malha aberta [Astro90].

A escolha inadequada do período de amostragem pode provocar, por um lado, uma baixa performance do controle (se grande), ou então requerer o computador para atender somente uma tarefa (se pequeno), não permitindo o controle multi-malha objetivado quando se usa uma rede local de comunicação como suporte de transmissão.

No controle de grandezas relacionadas com a automação da manufatura (usando servomotores), e que usam uma rede local como suporte, nem sempre será conveniente adotar a premissa de que a velocidade de resposta do sistema em malha fechada deve ser bem maior que em malha aberta. Isto porque o objetivo, neste caso, é o de compartilhar os recursos do barramento com outras grandezas a serem monitoradas, como eventos ou alarmes, ou ainda outras malhas a serem controladas.

Desta forma, é necessário um estudo mais detalhado com o objetivo de se estabelecer uma relação de compromisso entre a resposta do sistema em malha fechada e a possibilidade ou conveniência de se usar ou não uma rede local de comunicação como suporte de transmissão.

Outro fato interessante relacionado com a escolha do período de amostragem é o tamanho da palavra dos conversores AD e DA e do microprocessador (ou processadores, no caso de uma rede). Isto se explica tendo-se em conta que se o desejado é uma alta precisão, então para altas taxas de amostragem é necessária uma palavra de dados maior, visto que todas as alterações da informação estão concentradas nos últimos bit's significativos e, se o tamanho da palavra não for compatível, então a alta taxa de amostragem não se justifica.

Em casos práticos, e dependendo do tipo do servomotor DC (ou motor DC) utilizado, a sua constante de tempo dominante (constante de tempo mecânica) pode variar desde alguns milissegundos (por exemplo, 6.2 mS para o servomotor DC 14206 da Pittman-Penn Engineering and Manufacturing Corp) até algumas centenas de milissegundos para servomotores

maiores ou motores DC não dimensionados para aplicações de controle (por exemplo, 205 mS para o motor DC MXE-6T). Os valores destas constantes de tempo são fornecidos com as especificações do servomotor pelo fabricante.

No caso em que não é possível obter a constante de tempo do sistema a ser controlado, e somente neste caso, a constante de tempo do motor pode ser tomada como referência para se obter o menor período de amostragem possível, no projeto do controlador. Tal procedimento, entretanto, deve ser precedido de uma análise criteriosa do ponto de vista da restrição temporal a ser imposta ao sistema de aquisição de dados e a rede de comunicação a serem utilizados.

### **3.5 - Definição de um Perfil Adequado para a Rede de Comunicação no controle de Grandezas da Automação.**

De acordo com o exposto na seção anterior, observa-se que a dinâmica das grandezas a serem controladas é que irá impor as características da rede de comunicação a ser empregada na malha de controle. Isto é válido indistintamente para grandezas do controle de processo e da automação da manufatura. Entretanto, pode-se dizer que uma rede de comunicação cuja performance atenda às exigências temporais da automação da manufatura, atenderá perfeitamente às do controle de processo. Sendo assim, esta seção tem o objetivo de estabelecer um perfil de rede de comunicação que atenda ao primeiro caso.

A rede de comunicação a ser utilizada na malha de controle de grandezas da manufatura, deve satisfazer o seguinte perfil:

- meio físico tipo par trançado blindado para diminuir custos e aumentar a imunidade a interferências eletromagnéticas;
- topologia em barramento com um número de estações inferior a 32 (trinta e dois) para permitir o uso da interface RS-485 e com método de acesso ao meio determinístico tipo mestre-escravos;

- protocolo simples, robusto e eficaz, com o menor número possível de camadas e de preferência integradas em Hardware para permitir o processamento dos algoritmos de controle em tempo real, bem como processar-se em estações a nível de sensores e atuadores;
- o menor número possível de informações adicionais incluídas nas mensagens e compatibilidade, mesmo que reduzida somente à estação mestre, com o modelo de referência OSI;
- camada de aplicação otimizada para o acoplamento de estações escravas (sensores e atuadores), sem necessidade de compatibilidade com o MMS;
- simples configuração e manutenção, operação que permita a entrada e saída de estações sem interferir no funcionamento normal do sistema.

Além disso, se mais de uma malha de controle for atendida por um mesmo sistema de comunicação tipo "Fieldbus", a escolha da rede de comunicação deve levar em conta sua capacidade de processar o controle de todas as malhas envolvidas. Isto requer a utilização de um executivo tempo real na estação controladora, cuja política de escalonamento permita atender a todas as malhas de controle, tendo seu período de amostragem como "deadline". No pior caso, têm-se diversas malhas de controle com período de amostragem curto e de igual duração. Neste caso, a soma dos tempos de comunicação entre todos os sensores, controladores e atuadores conectados à rede de comunicação deve respeitar a seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^n (\tau_{(se)i} + \tau_{(co)i} + \tau_{(at)i}) \leq T_{(min)} \quad (3.16)$$

onde  $n$  é o número de malhas a serem atendidas,  $\tau_{(se)i}$  é o tempo de resposta de um sensor, incluindo o tempo de envio da requisição do dado, tempo de processamento do protocolo e o tempo de transmissão dos dados de volta ao controlador,  $\tau_{(co)i}$  é o tempo de execução dos algoritmos de controle empregados e  $\tau_{(at)i}$  é o tempo de envio do sinal de controle a um atuador,

incluindo o tempo de envio da confirmação de recepção por parte do sensor e  $T(min)$  é o menor período de amostragem correspondente a malha de mais alta dinâmica entre todas as demais.

Desta forma, o controle de grandezas da manufatura, que envolvam, por exemplo, máquinas ferramentas e robôs industriais, possuem, em geral, mais do que um servomotor no desempenho da suas tarefas controlando grandezas tais como: posição de eixos, velocidade, aceleração, torque de eixos, força de avanço, temperaturas da peça, da ferramenta e do óleo, estado de chaves fim-de-curso, alarmes e etc. Neste caso, levando-se em consideração as constantes de tempo dominante de servomotores para estas aplicações, fornecidas pelos catálogos dos fabricantes, pode-se estabelecer que o período de amostragem da malha de dinâmica mais elevada de uma máquina ferramenta situa-se abaixo de 1.0 mS [Stemm91].

Sendo assim, se considerarmos a implementação do controle de uma única malha, com aquele período de amostragem, somente uma das propostas de padronização (FIP) de redes "Fieldbus" apresentadas no capítulo anterior possui, em princípio, algum tipo de serviço que permita atender adequadamente tal exigência.

Um exemplo prático, como é o caso de um torno industrial, em que o controle de posição da ferramenta de usinagem é feito segundo três eixos, cujo período de amostragem da malha de dinâmica mais elevada possa ser escolhido como 1.5 mS, e considerando ainda a necessidade de uma malha de controle adicional para controle de temperatura da ferramenta, verifica-se que todo o processamento necessário ao controle de qualquer uma das quatro malhas envolvidas, incluindo aí o algoritmo de controle, o processamento do protocolo da rede e do driver de aquisição de dados, deve ser feito no máximo em 0.3 mS, permitindo, assim, uma folga de 0.3 mS ao sistema de comunicação.

Outro caso prático seria a utilização de uma rede de comunicação para o controle de um robô, tomando-se como exemplo, o modelo RHINO XR4 SERVO ROBOT fabricado por RHINO ROBOTS INC., e que possui 5 (cinco) graus de liberdade e 6 (seis) servomotores ao longo de suas juntas. Neste, a malha de controle de dinâmica mais elevada é aquela que possui um servomotor PITTMAM modelo 14204 acionando a garra do mesmo, cuja constante de tempo

mecânica é de 7 mS [Ramak88] e, neste caso, se levarmos em conta que o período de amostragem deve ser da ordem de 1/5 (um quinto) da constante de tempo em malha aberta, o projeto do controlador irá se basear num período de amostragem de 1.4 mS.

Observa-se assim, que todo o controle de cada uma das malhas deve ser processado em aproximadamente 0.2 mS, e, neste caso, muito provavelmente, nenhuma das redes propostas como padrão "Fieldbus" atenderia tal exigência de performance, sendo que as redes CAN e SERCOS apresentam performances com maiores possibilidades de atender a tais requisitos temporais.

Mesmo que a rede escolhida tenha um tempo de resposta extremamente curto, tem-se, ainda, o problema da perda de mensagens. Em condições normais, a camada de enlace da rede é capaz de identificar a ocorrência de um erro de transmissão e uma repetição do envio é requerida. Nas circunstâncias aqui discutidas, a repetição do envio pode implicar no não atendimento do período de amostragem da malha de controle.

### **3.6 - Estudo do Efeito da Perda de Mensagens em um Controlador.**

A degradação do controle decorrente de perda esporádica de sinais nos instantes de amostragem foi estudada sobre uma planta prática, descrita a seguir.

A planta em estudo é uma bancada didática da marca DIGIAC 710 composta de um servoamplificador DC linear com ganho ajustável, um servomotor DC do tipo SA-640A-22, com 27,5 V e 1500 rpm de tensão e velocidade máximas, respectivamente, um tacogerador do tipo SA-740A-E, com saída de 7V/1000 rpm, ambos fabricados por SERVO-TEK PRODUCTS CO., e um servopotenciômetro do tipo MP-109, fabricado por WATERS MFG. INC..

A função de transferência contínua do conjunto para a posição, considerando um modelo de primeira ordem, obtida com o uso de um sistema de aquisição de dados (ADDA-10) instalado em um microcomputador do tipo PC-286 e assistida pelo pacote de software ISAC (Identificador de Sistemas Assistido por Computador) [Lima91] é dada por:

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = 4.71 \frac{0.938}{s(0.149.s + 1)} \quad (3.17)$$

O período de amostragem (T), de 20 mS, foi escolhido para permitir a possibilidade da malha de controle ser fechada via rede de comunicação e teve como critério 1/4 do tempo de subida ( $t_s$ ), que, por sua vez, foi tomado como aproximadamente 1.6 vezes a constante de tempo em malha fechada do sistema ( $\tau_d$ ), especificada como 1/3 da constante de tempo em malha aberta do sistema ( $\tau$ ), tomada como base.

A função de transferência discretizada do modelo usando-se o período de amostragem escolhido e um sustentador (holder) de ordem zero, é dada por:

$$\underline{B}_0.G(z) = 4.71 \frac{0.0031z + 0.0012}{(z-1).(z-0.8744)} \quad (3.18)$$

O controlador principal foi implementado num algoritmo PID, que utiliza o mecanismo da atualização das variáveis internas como eliminação de sobrecarga da ação integral [Brucci86], através de:

$$C(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{K_1 \left( z^2 - \frac{K_2}{K_1} z + \frac{K_3}{K_1} \right)}{z(z-1)} \quad (3.19)$$

onde a relação entre  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ , para se anular os pólos estáveis do sistema, é dada por:

$$\frac{K_2}{K_1} = 1.8744 \text{ e } \frac{K_3}{K_1} = 0.8744 \quad (3.20)$$

A função de transferência em malha fechada obtida no final é:

$$H(z) = \frac{4.71K_1(0.0031z + 0.0012)}{z^2 + (0.0146K_1 - 1)z + 0.0056K_1} \quad (3.21)$$

e os limites de valores de  $K_1$  para que o sistema se mantenha estável, obtidos após aplicação do critério de estabilidade de Jury, são dados por:  $0 < K_1 < 123$ .

A figura 3.4, abaixo, apresenta a resposta prática obtida para uma referência de posição igual a  $100^\circ$ , sem perdas das ações de controle e com os ganhos do controlador ajustados para  $K_1 = 12$ ,  $K_2 = 22.5$  e  $K_3 = 10.5$ .

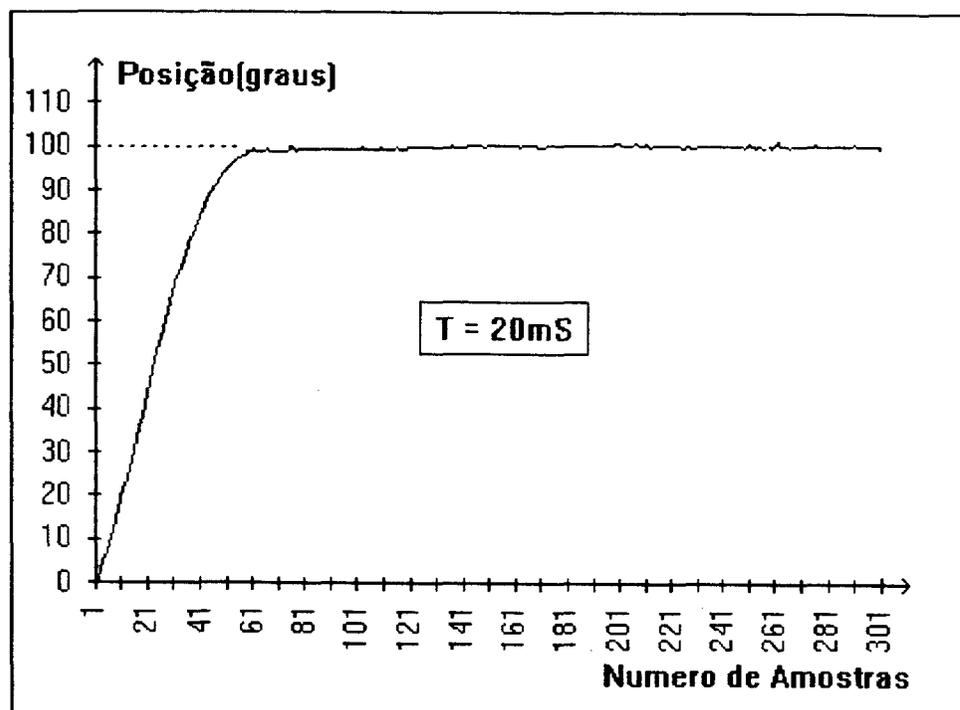


Figura 3.4- Saída de posição do controlador

A grande maioria dos sistemas de aquisição de dados existentes hoje são baseados em conversores digital-analógicos que incorporam um sustendor (holder) de ordem zero. Este dispositivo funciona de tal modo que retém o valor de tensão aplicada ao atuador entre um instante de amostragem e o instante posterior. Sendo assim, se ocorrer uma perda de mensagem na rede correspondente a uma ação de controle a ser aplicada, muito comum em ambientes industriais, o valor de tensão aplicada no instante de amostragem anterior será mantido para o seguinte, fazendo com que o período de amostragem escolhido no projeto do controlador, naquele instante, passe a ter o dobro do valor original.

Neste caso, como a escolha do período de amostragem é feita, em geral, com o máximo valor admitido pela dinâmica da planta, isto porque o objetivo é usar a rede de comunicação como um recurso a ser compartilhado na implementação de um controle

multimalhas, o efeito na performance do controle devido a uma ou mais perdas de mensagens é, no mínimo, prejudicial, podendo até se tornar intolerável em função da precisão exigida pelo processo controlado.

Uma maneira simples de se observar tal efeito matematicamente, é através da função de transferência discreta do sistema, como será mostrado a seguir. No nosso caso, o controle de posição é feito sobre uma bancada cujo modelamento matemático foi feito considerando-o como um sistema de primeira ordem acrescido de um integrador. Isto é, a função de transferência contínua é da forma:

$$G(s) = \frac{g}{s(s + \alpha)} \quad (3.22)$$

A função de transferência discreta da planta, em função do período de amostragem, será dada por:

$$BoG(z) = \frac{a(z + \frac{b}{a})}{(z-1)(z - e^{-\alpha T})} \quad (3.23)$$

sendo:  $a = \frac{g}{\alpha} \left( \frac{e^{-\alpha T}}{\alpha} - \frac{1}{\alpha} + 1 \right)$  e  $b = \frac{g}{\alpha} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{e^{-\alpha T}}{\alpha} - e^{-\alpha T} \right)$ .

Dessa forma, observa-se claramente que a função de transferência discreta, usada para o projeto do controlador PID, possui um pólo que depende da constante de tempo dominante do sistema e do período de amostragem escolhido. E, ainda mais, se houver uma variação no período de amostragem, haverá em consequência um deslocamento do pólo do sistema discreto em malha aberta.

O critério utilizado no projeto do controlador PID, descrito aqui, está centrado no fato de que o pólo estável da planta deve ser anulado por um zero do controlador. Sendo assim, supondo a ocorrência de uma perda de mensagem, teremos um período de amostragem  $T = 40$  mS e iremos observar que a nova função de transferência discreta em malha aberta do sistema será dada por:

$$\underline{B_o.G}(z) = 4.71 \frac{0.003z + 0.007}{(z-1)(z-0.76)} \quad (3.24)$$

Se considerarmos agora que o controlador calculado anteriormente continua sendo válido para esta situação, isto é, um controlador PID cujas relações entre os ganhos é dada pela equação 3.20, então, o zero do controlador não mais anulará o pólo estável da planta, e a nova função de transferência em malha fechada discreta passará a ser:

$$H(z) = \frac{4,71K_1(0.003z^2 + 0.00439z - 0.0061)}{z^3 + (0.0141K_1 - 1.76)z^2 + (0.0206K_1 - 0.76)z - 0.0287K_1} \quad (3.25)$$

Observa-se, assim, que a perda de mensagem acarretou uma equação característica de ordem superior (três) àquela obtida em situação normal.

Considerando ainda o mesmo controlador projetado para a seção anterior e supondo o ganho  $K_1 = 10$  teremos, para a equação característica em situação normal, duas raízes (pólos em malha fechada)  $p_1 = 0.78$  e  $p_2 = 0.071$  que situam dentro do círculo unitário, implicando num sistema estável. Por outro lado, se ocorrer uma perda de mensagem, para o mesmo ganho acima, a equação característica do sistema será alterada e passará a ter as seguintes raízes:  $p_1 = 1.9739$ ,  $p_2 = -0.1769 + j0.3380$  e  $p_3 = -0.1769 - j0.3380$ . Neste caso, verifica-se que o pólo real situa-se fora do círculo unitário, caracterizando um sistema instável.

Em função do exposto, fica claro que o controle multimalhas via rede requer a definição de uma estratégia de controle que leve em consideração eventuais perdas ou deturpações de quadros na rede em casos onde uma simples repetição não é possível.

Sendo assim, com o objetivo de diminuir os efeitos degradantes das perdas de mensagens no controle da planta, no próximo capítulo será proposta uma estratégia de predição da ação de controle baseada em lógica nebulosa (fuzzy logic), em que apresenta-se uma introdução teórica da lógica nebulosa e descreve-se as etapas de projeto para um controlador-preditor a ser executado em paralelo com o controlador PID descrito acima.

# CAPÍTULO IV

## DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PREDITOR NEBULOSO

### 4.1 - Introdução.

Neste capítulo, será apresentada a arquitetura proposta para o controle de posição via rede, cujas perdas de mensagens têm seus efeitos diminuídos sobre a performance do controle através da entrada em operação de um preditor baseado em lógica nebulosa. A escolha da lógica nebulosa (fuzzy logic) como estratégia de solução para o problema das perdas de mensagens ao longo da rede está relacionada com as facilidades permitidas por esta pela não exigência do modelo matemático do processo a ser controlado.

Além disso, a lógica nebulosa é uma técnica simples, de grande aceitação e aplicabilidade, em especial, na solução de problemas de decisão e controle. Sua aplicação é especialmente recomendada na solução de problemas cuja construção do modelo matemático é difícil ou inviável na prática [Zadeh73]. Ela é uma extensão da lógica Aristotélica e da lógica formal de Boole, onde a classificação dos fenômenos é sempre feita de acordo com duas condições: **verdadeiro ou falso**, não permitindo situações intermediárias que possam expressar um certo *grau intermediário de verdade* nos acontecimentos. Para satisfazer esta condição, valores qualitativos que usam termos linguísticos são introduzidos de maneira a expressar um estado ou uma condição intermediária [Zadeh65].

É comum, em lógica nebulosa, o uso de termos imprecisos, tais como: muito frio, frio, agradável, morno, quente e muito quente na classificação da temperatura de um determinado ambiente, ou ainda, grande negativo, médio negativo, pequeno negativo, zero, pequeno positivo, médio positivo, grande positivo na classificação do erro de um sistema de posição. Acrescente-se a isso, que também é possível e comum a sobreposição desses valores e,

---

assim, poderíamos ter uma situação em que a temperatura do ambiente possui um certo grau de "frio" sobrepondo-se a um certo grau de "agradável".

#### **4.2 - Arquitetura de Controle Proposta Considerando Perdas de Mensagens.**

De acordo com as considerações da seção anterior no que diz respeito ao preditor, uma proposta de arquitetura para uma única malha é apresentada na figura 4.1 [Salom94], onde se tem as estações **controladora, sensora e atuadora**, a disposição do **controlador e preditor** nas mesmas e uma aplicação onde se implementa o controle de posição com um motor DC rotativo.

A disposição do preditor na estação atuadora se deve ao fato de que, em geral, a estação controladora, além de possuir um protocolo que a obriga a processar uma maior quantidade de informações, também pode rodar mais que uma aplicação, como é o caso multi-malhas, enquanto que a estação atuadora tem os serviços oferecidos pelas camadas de forma simplificada e processa poucas informações. Além disso, como a perda ou erro na mensagem pode ocorrer quando a mesma for emitida da estação sensora ou da controladora, por uma questão de segurança, é mais conveniente que o preditor seja incorporado à estação atuadora.

O preditor apresentado abaixo será objeto de estudo neste capítulo, sendo que procurou-se empregar um controlador PID, estudado no capítulo anterior, por ser um dos algoritmos mais tradicionais, de simples implementação e proporcionar um tempo de execução reduzido. Já para o preditor, optou-se por algoritmo baseado em **lógica nebulosa**, isto pelo fato do mesmo ter uma boa precisão, não sofrer alterações devido às variações dos parâmetros internos da planta e por não exigir um modelo matemático do processo.

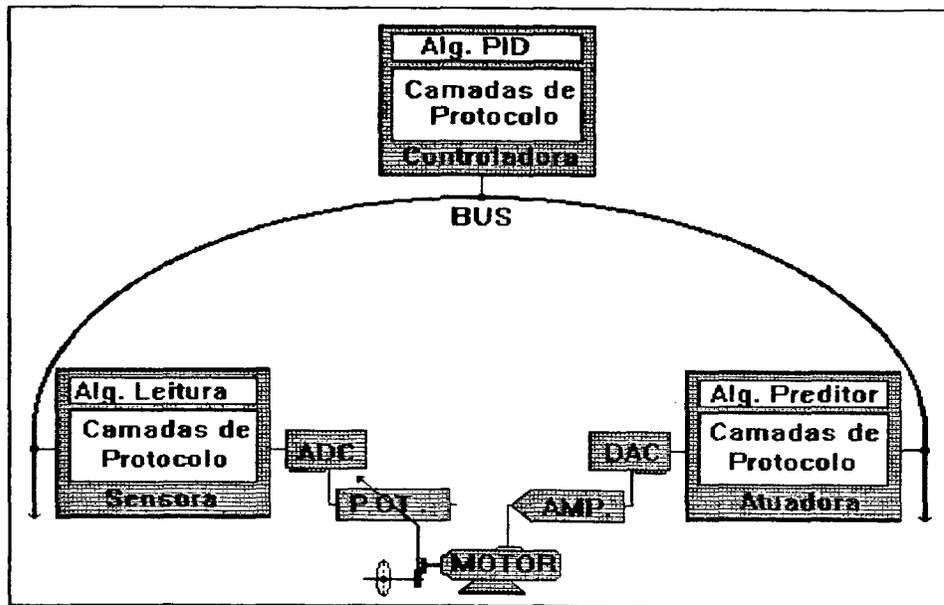


Figura 4.1 - Arquitetura proposta para a malha de controle

No caso proposto, duas possibilidades devem ser consideradas: na primeira, a estação sensora enviará a informação da saída do processo tanto para a controladora quanto para a atuadora; se esta informação for recebida integralmente e sem danos, ambas iniciam o cálculo do sinal de controle, uma baseando-se no valor atual da grandeza lida pelo sensor (algoritmo PID) e a outra, nos valores anteriores do erro e da derivada do erro (algoritmo PREDITOR). Vencida esta etapa, a estação controladora enviará à atuadora o sinal de controle calculado e valores de erros de instantes de amostragens anteriores. Se a atuadora recebê-los corretamente, despreza os cálculos do preditor local e envia o sinal de controle recebido à planta. Caso contrário, ela aplicará o controle calculado pelo preditor.

Na segunda possibilidade, a mensagem da estação sensora se perde ou é corrompida por algum ruído e, neste caso, a estação atuadora inicia imediatamente o cálculo do sinal de controle pelo preditor e, em seguida, aguarda transcorrer o "slot" de tempo disponível (período de amostragem) na expectativa de ainda receber uma mensagem da controladora, que pode ou não ter requisitado uma ou mais retransmissões da sensora. Se isto não ocorrer, o controle predito é aplicado. Neste caso, a atualização dos valores utilizados pelo algoritmo PID pode ser feito de acordo com duas possibilidades: na primeira, o valor do controle predito é enviado a estação controladora na amostragem seguinte; e na segunda, o sinal de saída da planta

cuja leitura foi anterior à perda, e que ficou armazenado na estação sensora, é enviado para que o PID recalcule o valor do controle e atualize o seu algoritmo.

Em seguida, dando continuidade a nível de implementação da arquitetura proposta acima, as próximas seções deste capítulo apresentarão uma introdução teórica da lógica e do controle nebulosos e o projeto de um controlador-preditor de posição baseado nessa técnica para o motor DC rotativo apresentado no capítulo anterior, sendo que a implementação e os resultados obtidos para o controle da planta usando-se a rede de comunicação "Fieldbus", cujo algoritmo do controlador PID se executa em paralelo com o referido preditor, será apresentado no próximo capítulo.

### 4.3 - Definições e Operadores da Lógica Nebulosa.

A seguir, algumas das definições e operadores mais utilizados em lógica nebulosa serão apresentados dentro do contexto das aplicações e necessidades de um controlador nebuloso.

Seja  $U$  um conjunto de objetos.  $U$  recebe o nome de **universo de discurso** e, neste caso, um conjunto  $A$  contido em  $U$  é definido como um conjunto de pares ordenados ( $F$ ) [Zadeh65, Azeve93] dados por:

$$F = \{u, \mu_A(u) | u \in U\} \quad (4.1)$$

onde  $\mu_A(u)$  é a função de pertinência do elemento  $u$  do conjunto  $A$  em seu universo de discurso  $U$ .

A função de pertinência  $\mu_A(u)$  pode assumir qualquer valor no intervalo  $[0,1]$ ; no caso de  $\mu_A(u) = 1$ , então o elemento  $u$  é um membro de  $U$ , e, se por outro lado,  $\mu_A(u) = 0$ , ele não é membro de  $U$ . Entretanto, o grau de pertinência de  $u$  em  $U$  pode variar dentro desse limite. Além disso, dados dois conjuntos  $A$  e  $B$ , as seguintes propriedades da lógica nebulosa são válidas:

a) a união de dois conjuntos  $A \cup B$  corresponde à função OR, e é dada por:

$$\mu(A \text{ OR } B) = \text{máx}(\mu A(u), \mu B(u)) \quad (4.2)$$

onde  $u$  é um elemento dos subconjuntos  $A$  e  $B$ .

b) a intersecção de dois conjuntos  $A \cap B$  corresponde à função AND, sendo escrita como:

$$\mu(A \text{ AND } B) = \text{min}(\mu A(u), \mu B(u)) \quad (4.3)$$

c) o complemento de  $A$  corresponde à função NOT, e é escrito como:

$$\mu(\text{NOT } A) = 1 - \mu A(u) \quad (4.4)$$

No caso de um controlador nebuloso, a sua saída ( $S$ ) é obtida através de uma composição entre as variáveis de entrada "fuzificadas" com um determinado grau de pertinência  $E_1$  e  $E_2$  correspondentes, por exemplo, ao grau de pertinência do erro de saída e da derivada do erro, respectivamente, podendo ser escrita como:

$$S = E_1 \circ (E_2 \circ Ri) \quad (4.5)$$

onde  $Ri$  é uma relação de inferência e  $\circ$  é o operador composição.

#### 4.4 - Estrutura de um Controlador Nebuloso.

As variáveis de entrada e saída de um controlador implementado em lógica nebulosa sofrem transformações ao longo de cada bloco funcional do sistema, como mostra a figura 4.2 abaixo:

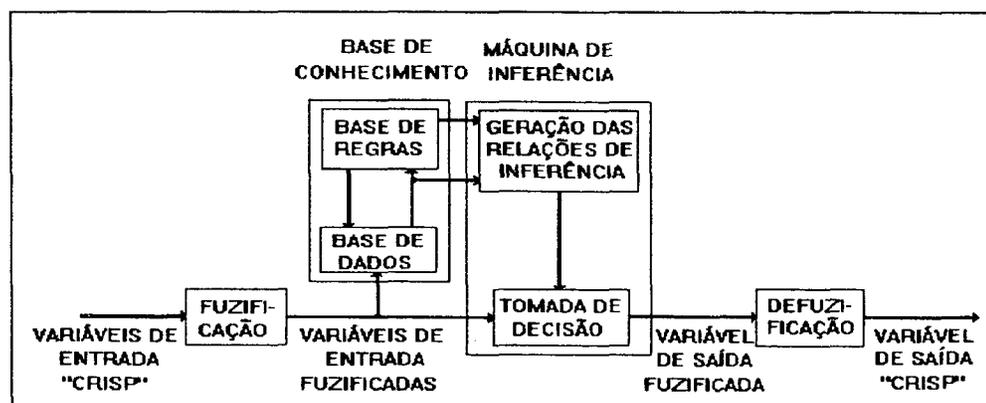


Figura 4.2 - Estrutura de um controlador nebuloso

Neste caso, tem-se a **fuzificação** das entradas que estabelece o **grau de pertinência** das mesmas em uma ou mais **funções de pertinência**. As funções de pertinência são pré-definidas e, em geral, assumem formas simples (triangulares, trapezoidais, retangulares) para a maioria dos casos.

Em seguida, um conjunto de **regras de controle**, responsáveis pelo comportamento do sistema e com o formato de instruções IF-THEN, são pré-estabelecidas pelo projetista em função da experiência e conhecimento adquirido do funcionamento do processo, bem como do tipo de resposta desejada para o mesmo. O lado IF de uma regra contém uma ou mais condições chamadas *antecedentes*, e o lado THEN, uma ou mais ações chamadas *consequentes*. Os antecedentes das regras correspondem diretamente aos graus de pertinência das entradas calculados durante o processo de fuzificação. Da avaliação das regras resulta a ação de saída ou consequente que representa o grau de pertinência da saída **nebulosa**.

O processo de **defuzificação** é necessário para "decifrar" o significado de ações vagas (ações fuzzy), tais como "diminua o controle" e também para resolver o problema surgido com ações conflitantes do tipo: "diminua a ação de controle" e "aumente a ação de controle", que podem ser disparadas por certas condições durante a etapa de avaliação das regras. Tais conflitos são resolvidos a partir de técnicas de *compromisso*, sendo que a mais comumente empregada é a do *centro de gravidade* que irá, então, produzir valores determinísticos da saída (no caso, ação de controle) a ser aplicada ao processo [Zadeh65, Azeve93, Viot93].

No caso do controlador apresentado na figura 4.2, temos que *a base de dados e a base de regras formam a chamada base de conhecimento do controlador*, sendo usada para se obter a relação de inferência  $R_i$ . A base de dados contém uma descrição das variáveis de entrada e saída fuzificadas; e a base de regras, como visto anteriormente, contém uma coleção de declarações condicionais IF-THEN, tais como:

"IF  $E_1$  is  $E_{1i}$  and  $E_2$  is  $E_{2i}$  THEN  $S$  is  $S_i$ "

onde  $E_1$  e  $E_2$  são as entradas,  $E_{1i}$  e  $E_{2i}$  são os graus de pertinência das entradas fuzificadas,  $S$  é a saída e  $S_i$  é o grau de pertinência da saída fuzificada. Assim, a relação de inferência obtida é expressa em termos de um produto cartesiano dos conjuntos  $E_{1i}$ ,  $E_{2i}$  e  $S_i$ , por:

$$R_i = E_{1i} \times E_{2i} \times S_i \quad (4.6)$$

Na próxima seção será discutido, a nível de implementação, um preditor de lógica nebulosa para um controle de posição, onde se procurará demonstrar a aplicação das definições apresentadas.

#### 4.5 - Projeto do Preditor Nebuloso de Posição Integrado ao Controlador PID/Rede de Comunicação.

A lógica nebulosa vem obtendo, atualmente, uma considerável importância na implementação de algoritmos destinados ao controle de processos, principalmente naqueles casos de difícil modelamento, quer seja por apresentarem não-linearidades, quer seja por possuírem parâmetros internos variáveis. Controladores nebulosos, com uma estrutura semelhante àquela da seção anterior, são hoje aplicados com sucesso em plantas químicas, no controle de velocidade e posição, em sistema de navegação de helicópteros não-tripulados como descrito em [Caval94], entre outros.

O preditor nebuloso proposto neste item possui, em linhas gerais, uma estrutura semelhante a um controlador nebuloso, exceto que o cálculo do controle a ser enviado baseia-se nos valores do erro e da derivada do erro de posição amostrados anteriormente à perda da mensagem, como mostra a figura 4.3. Essas duas variáveis são definidas, respectivamente, por:

$$e(K-n) = s_r^*(K-n) - s_r(K-n) \quad (4.7)$$

e

$$\Delta e(K-n) = e(K-n) - e(K-(n+1)) \quad (4.8)$$

onde:

- $K$  é o instante de amostragem atual;
- $n = 1, 2$  ou  $3$ , é o número da mensagem perdida;
- $s_r^*(K-n)$  é a referência de posição e  $s_r(K-n)$  é a resposta de posição do sistema, ambos no período de amostragem  $(K-n)$ ;
- $e(K-n)$ ,  $e(K-(n+1))$  e  $\Delta e(K-n)$  são os erros e a derivada do erro nos seus respectivos períodos de amostragem.

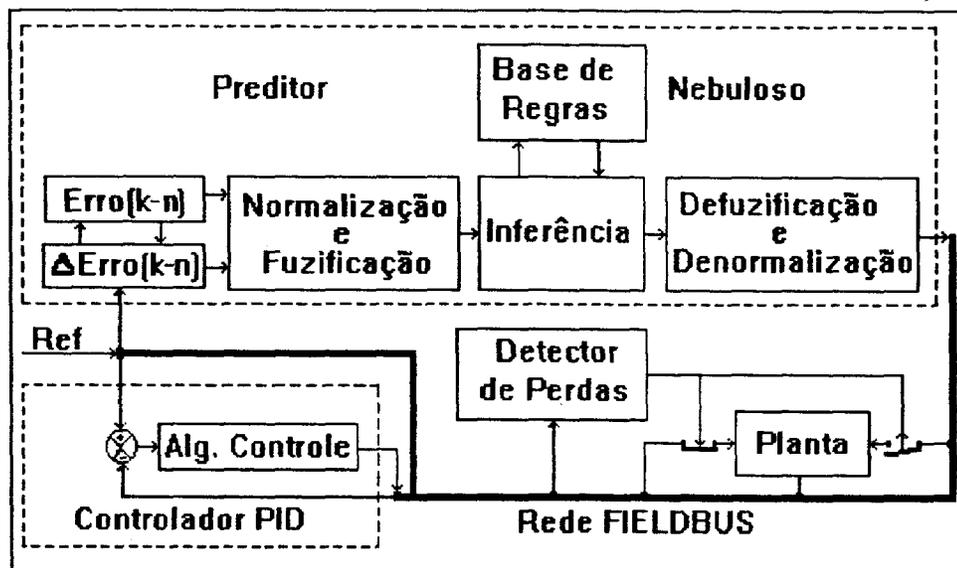


Figura 4.3 - Estrutura do controlador/preditor de lógica nebulosa

As variáveis são armazenadas dinamicamente na memória do computador para até três amostragens anteriores à atual. Se ocorrer um erro na transmissão no controle calculado via algoritmo PID ou na leitura atual da saída do sistema, ocorre um chaveamento imediato do contexto e as variáveis de entrada do preditor (erro e derivada do erro) são selecionadas e normalizadas no primeiro bloco de entrada do preditor.

Os demais blocos funcionais representados na figura 4.3 tiveram suas características analisadas em capítulos anteriores, exceto o bloco **detector de perdas** que é parte efetiva do

protocolo da rede. Este está incorporado ao controle lógico de enlace (Logical Link Control-LLC) na camada de enlace da rede e executa-se de forma distribuída tanto na estação *controladora* quanto na *atuadora* (ver figura 4.1).

#### 4.6 - A Dinâmica de Controle Pretendida.

A dinâmica pretendida para o controle de posição deve proporcionar uma resposta rápida, o menor sobrepico possível e erro nulo em regime permanente. A estratégia para se atingir estes objetivos tomará como base para obtenção das regras de controle, o comportamento das curvas de resposta da posição, do erro e da derivada do erro em cada uma das regiões assinaladas (a, b, c, d, e), bem como sobre cada ponto de intersecção das retas verticais (1, 2, 3, 4, 5) com cada uma das curvas, como mostra a figura 4.4, cujo objetivo é o de proporcionar, unicamente, uma maior facilidade de compreensão do critério de escolha das regras de controle a serem apresentadas no próximo item [Liaw91].

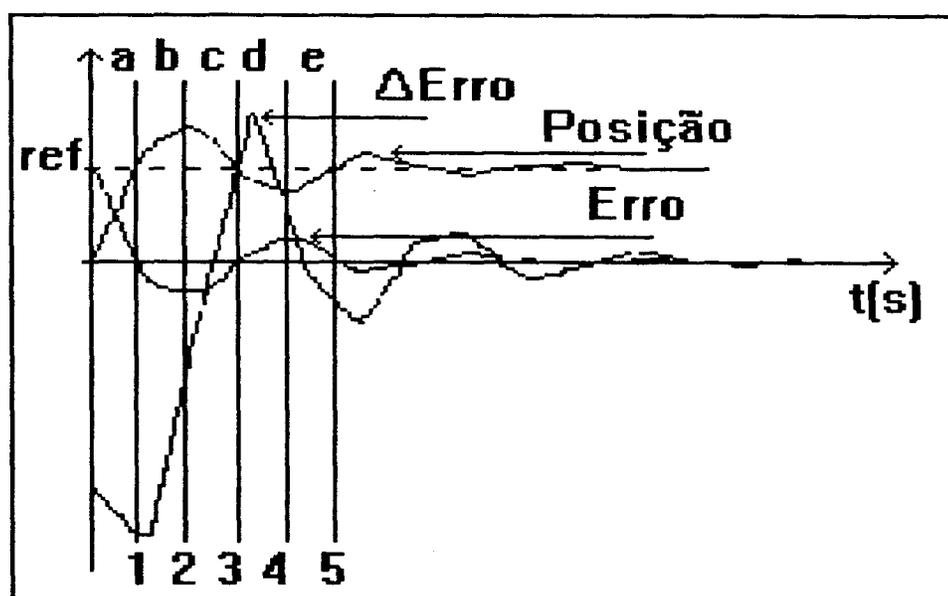


Figura 4.4 - Dinâmica da posição, do erro e da derivada do erro

As retas 1, 3 e 5 interceptam a curva da posição quando esta passa pela referência, o que corresponde a erro nulo; a reta 2 intercepta a curva da posição num máximo, correspondendo a um erro máximo negativo; finalmente, a reta 4 intercepta a posição num mínimo, correspondendo a um erro máximo positivo.

#### 4.7 - As Regras Linguísticas de Controle e as Funções de Pertinência.

As regras linguísticas de controle, mostradas na tabela 4.1, são formadas a partir de uma combinação prévia de três tipos de *índices* obtidos a partir de cada uma das regiões assinaladas nas curvas da figura 4.4, a saber: *os sinais (negativo ou positivo) e amplitudes do erro e da sua derivada, a mudança no sinal (de negativo para positivo ou vice versa) do erro e a amplitude da derivada e, finalmente, a amplitude do erro e a mudança no sinal da derivada* [Gia93]. Assim, se o erro for **negativo-grande**, e a derivada do erro for **negativa-média**, então estaremos dentro da região **b** da figura 4.4, e a ação de controle a ser enviada à planta deverá ser **negativa-grande**. A quantificação destas regras, para se obter a ação de controle desejada, será feita através de um conjunto de regras linguísticas definido como:

$$\{NG, NM, NP, ZE, PP, PM, PG\}$$

onde N é negativo, P é positivo, G é grande, M é médio, P, como segundo caracter no anagrama, é pequeno e ZE é zero.

$\Delta$ ERRO(K-n)	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
ERRO(K-n)							
NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
NP	NM	NM	NM	NM	NP	NP	NP
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	PP	PP	PP	PM	PM	PM	PM
PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
PG	PG	PG	PG	PG	PG	PG	PG

Tabela 4.1 - Regras de controle

As funções de pertinência (fp's), correspondentes a cada um dos conjuntos linguísticos apresentados acima, e que irão completar a chamada "base de conhecimento", foram definidas nesta aplicação como sendo do tipo triangulares conforme sugerido por [Liaw91], e

são mostradas na figura 4.5, onde os *universos de discurso* do erro, da derivada do erro e da ação de controle são: -1.1 V a 1.1 V, -15.1 V/mS a 15.1 V/mS, -10.1 V a 10.1 V, respectivamente, sendo que todos os valores "crisp" passam por um processo de normalização antes da fuzificação. As inclinações variáveis nas fp's fizeram-se necessárias por proporcionarem uma maior precisão para a saída do sistema em regime permanente.

Os ajustes feitos na base de conhecimento levaram em conta, implicitamente, através da saída desejada, o modelo da planta. Além disso, observou-se que das 49 (quarenta e nove) regras disponíveis (ver Tabela 1) apenas 15 (quinze) eram suficientes para o funcionamento adequado do preditor. Isto ocorre porque, por exemplo, quando o erro é positivo grande (PG), independentemente do valor da derivada do erro, a ação de controle deverá ser positiva grande (PG), constituindo, assim, uma regra localmente generalizada ou "meta-regra" como descrito em [Barcz93].

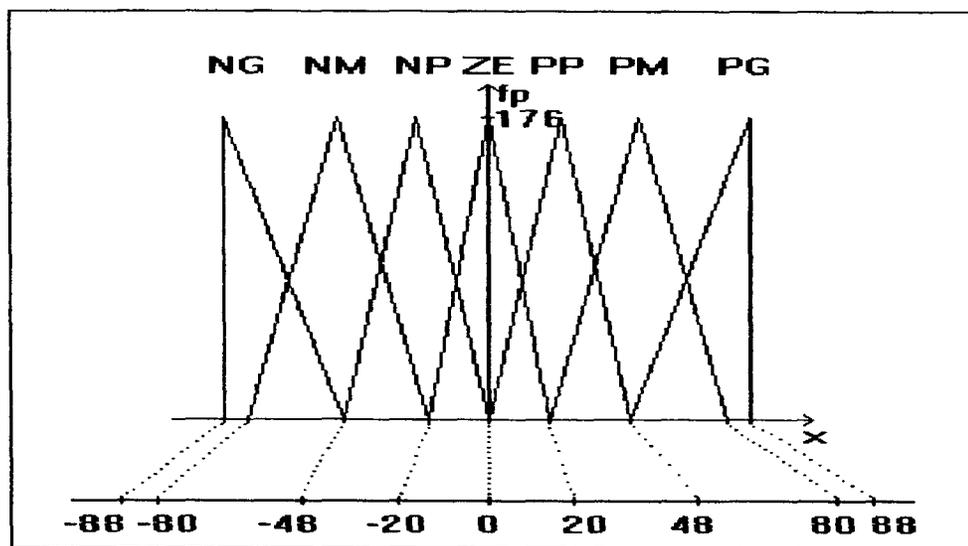


Figura 4.5 - Funções de pertinência

Como o controlador PID exerce sua ação de controle baseando-se no erro da amostragem atual e no controle e erros de amostragens anteriores, quando o preditor devolve a gerência dos cálculos ao algoritmo PID, é necessário que a ação de controle da amostragem

anterior seja devolvida à estação controladora (ver figura 4.1). Isto é feito via barramento e no primeiro "slot" de tempo destinado à estação controladora para leitura de mensagens das demais estações.

#### 4.8 - A Estrutura de Dados usada na Implementação do Preditor.

A implementação do preditor nebuloso em linguagem C foi feita, como sugerido em [Viot92], utilizando-se os seguintes tipos de dados:

- entradas do sistema;
- funções de pertinência das entradas e da saída;
- cálculo dos graus de pertinência dos antecedentes;
- avaliação das regras;
- obtenção do grau de pertinência da saída;
- saídas do sistema.

As entradas do sistema, após passarem por uma etapa de normalização, são inseridas num arranjo de uma lista encadeada global, como ilustra a figura 4.6a.

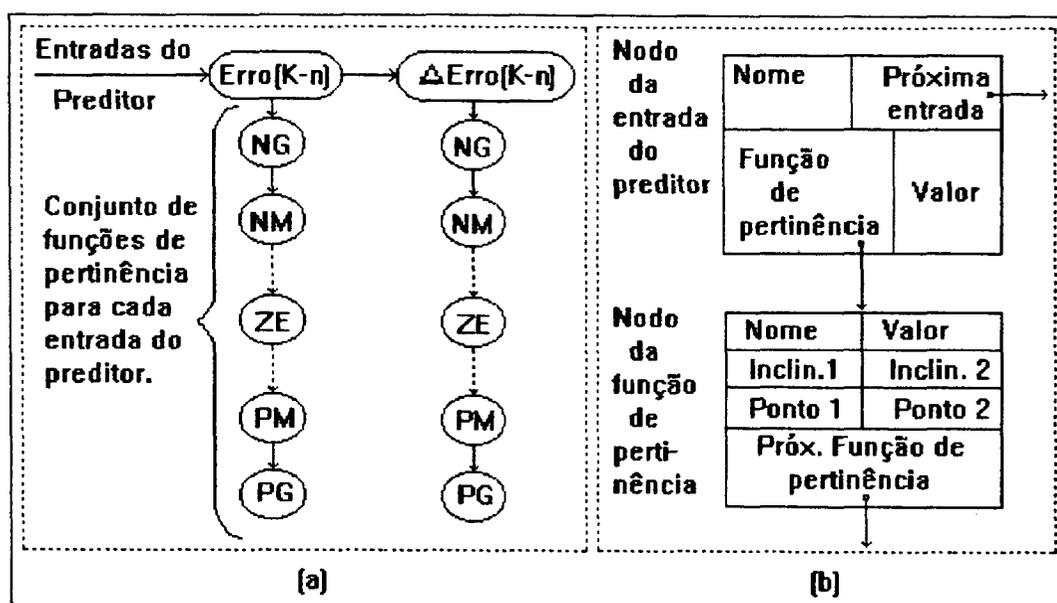


Figura. 4.6 - a - Entradas de dados do sistema, b - Estrutura de dados detalhada.

As estruturas apresentadas na figura 4.6b mostram mais detalhes do arranjo de dados da entrada. Nesta figura, observa-se que o nodo de *entrada do sistema* é direto e contém: um **nome** para a entrada (erro), um **ponteiro para a função de pertinência**, um **ponteiro para a próxima entrada** (derivada do erro) e um campo para o **valor** da entrada.

A estrutura para a *função de pertinência* contém: um campo para o **nome** da função de pertinência (por exemplo NP), dois **pontos** pertencentes ao eixo-x e duas **inclinações** que juntos descrevem uma função de pertinência do tipo triangular ou trapezoidal. Estas informações são usadas no processo de *fuzificação*, através do cálculo do grau de pertinência dos antecedentes de cada regra, cujo método a ser descrito abaixo usa como referência a figura 4.7a:

1) calcula-se:  $\text{delta } 1 = x - \text{pto } 1$  e  $\text{delta } 2 = \text{pto } 2 - x$

IF( $\text{delta } 1 \leq 0$ ) ou ( $\text{delta } 2 \leq 0$ ) THEN  $\text{gp} = 0$

2) verifica-se: ELSE

$\text{gp} = \min(\text{delta } 1 * \text{incl } 1, \text{delta } 2 * \text{inc } 2, \text{LS})$

onde:  $\text{gp}$  é o valor do grau de pertinência a ser calculado,  $\text{inc } 1$  e  $\text{inc } 2$  são as inclinações das retas (1) e (2) indicadas na figura e  $\text{LS}$  é o limite superior do grau de pertinência.

O valor resultante após a aplicação do método apresentado para o cálculo do antecedente, é armazenado no campo **valor** da estrutura função de pertinência.

A *estrutura de regras* é representada por dois conjuntos de ponteiros, como mostra a figura 4.7b abaixo.

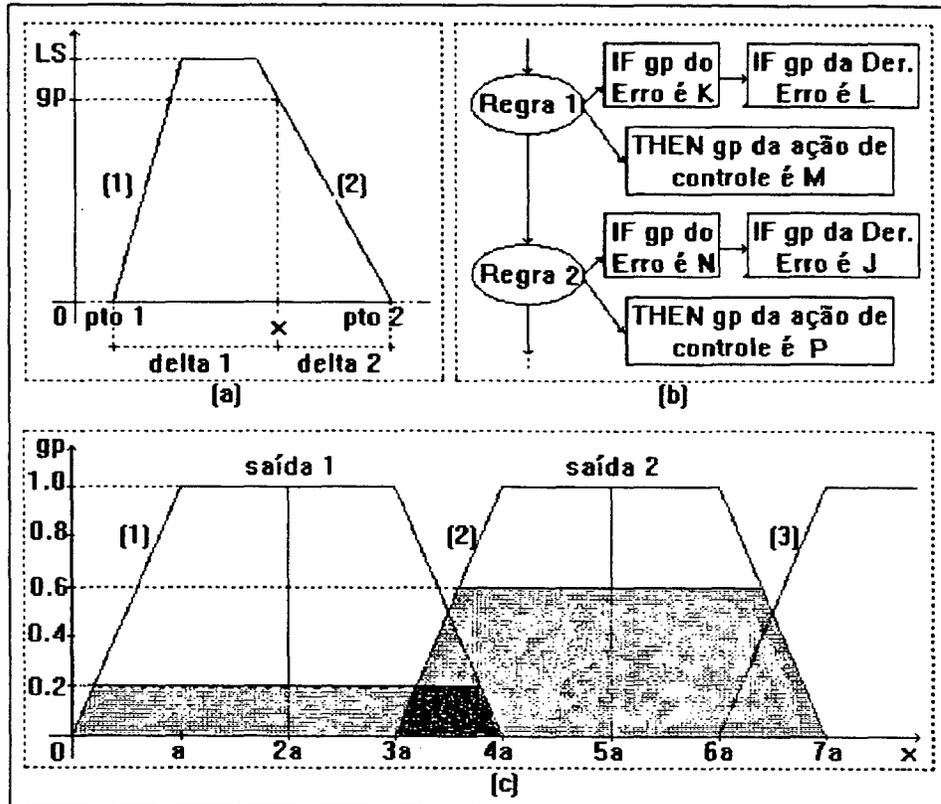


Figura. 4.7 - a - Cálculo do grau de pertinência dos consequentes, b - Base de regras e c - Método usado na defuzificação da saída

O primeiro conjunto aponta para aqueles **valores antecedentes** que serão usados na determinação do valor consequente de cada regra; já o segundo conjunto, aponta para a localização do **valor consequente** a ser aplicado na obtenção da saída.

A saída do sistema e as funções de pertinência da saída são tratadas de forma semelhante ao arranjo de dados da entrada apresentado na figura. 4.6a. Entretanto, o processo de **defuzificação**, que é baseado no "método do centro de gravidade", pode ser explicado tendo-se como base a figura. 4.7c e assumindo que as saídas 1 e 2 estão com os valores consequentes de **0.2** e **0.6** competindo entre si, através das seguintes etapas:

1) calcula-se o *ponto centróide* para as funções de pertinência das saídas 1 e 2, que, neste caso, assumem os valores **2a** e **5a**, respectivamente;

2) determina-se a área sombreada nas funções de pertinências das saídas 1 e 2 que, genericamente, são dadas por:

$$A = \frac{gp}{2} \left[ 4a + \left( 4a - 2 \frac{gp}{inc} \right) \right] \quad (4.9)$$

Para o caso específico, tem-se:

$$A_1 = \frac{0.2}{2} \left[ 4a + \left( 4a - 2 \frac{0.2}{inc1} \right) \right] \quad (4.10)$$

e

$$A_2 = \frac{0.6}{2} \left[ 4a + \left( 4a - 2 \frac{0.6}{inc2} \right) \right] \quad (4.11)$$

3) obtém-se a **saída defuzificada do sistema**, através da média dos centróides ponderada pelas áreas calculadas, como segue:

$$saída\ defuz = \frac{A_1 \cdot 2a + A_2 \cdot 5a}{A_1 + A_2} \quad (4.12)$$

Após este último procedimento, resta somente a denormalização do valor obtido para a saída e aplicá-lo à planta.

#### **4.9 - Resultados Obtidos com o Controlador/Preditor quando se Simula as Perdas de Mensagens e a Rede de Comunicação.**

Os resultados de simulação, obtidos ainda sem o uso da rede de comunicação, com os ganhos do controlador PID ajustados em  $K_1 = 12$ ,  $K_2 = 22.5$  e  $K_3 = 10.5$ , foram obtidos de acordo com as seguintes etapas: primeiramente, foi desenvolvido um pequeno ambiente em linguagem C integrando o controlador, o preditor nebuloso; em seguida, utilizou-se uma implementação prática do controle de posição do servomotor DC através do sistema de aquisição de dados ADDA-10. As curvas obtidas, como apresentado na figura 4.8, permitiram comparar a performance do algoritmo PID operando sem perdas de mensagens com a do

algoritmo híbrido PID-PREDITOR considerando 20% de perdas aleatórias na leitura do sinal do sensor. Estas perdas, na prática, são detectadas pela *camada de enlace* da rede Fieldbus.

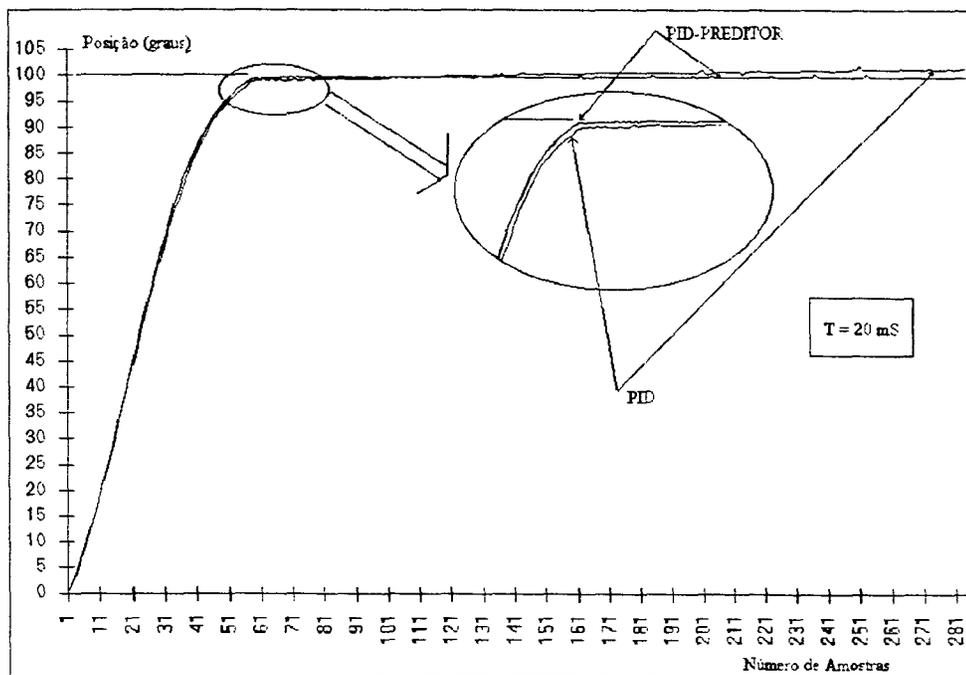


Figura. 4.8 - Curvas obtidas na implementação prática

Analisando as curvas obtidas, verifica-se que o algoritmo híbrido PID-PREDITOR permite a obtenção de um comportamento dinâmico adequado do sistema a controlar mesmo na presença de falhas de leitura do sensor.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados e os gráficos obtidos considerando-se o sistema completo e integrando-o completamente ao hardware e todos os módulos de software com a rede de comunicação.

# CAPÍTULO V

## A IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE E SOFTWARE E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 - Introdução.

Este capítulo descreve a implementação da proposta de controle e predição da ação de controle apresentada ao longo dos capítulos anteriores. Para tanto, a rede de comunicação PROFIBUS foi escolhida para esta aplicação, em primeiro lugar, pelo fato de ser uma das propostas que está contribuindo junto aos órgãos normalizadores internacionais, notadamente o IEC, pela constituição de um padrão internacional de rede industrial em "barramento de campo" ou Fieldbus; e, em segundo lugar, pela disponibilidade de um protótipo por parte da fundação CERTI, cujo uso foi permitido ao LCMI-UFSC.

Um fato interessante que ocorre no sentido de degradar o controle discreto de uma planta industrial qualquer, e que já foi discutido em capítulos anteriores, mais especificamente no capítulo III, é uma possível escolha inadequada do período de amostragem do mesmo.

Entretanto, uma vez escolhido criteriosamente um período de amostragem, há ainda um outro fato que contribui na degradação do controle, quando se utiliza uma rede de comunicação como suporte de transmissão em sistema de controle crítico no tempo: as perdas definitivas de mensagens, isto é, aquelas perdas que ocorrem no meio e que, por uma necessidade em cumprir um limite de tempo (deadline), não permitem repetições além de um limite pré-estabelecido.

A seguir, neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para os tempos de resposta permitidos pelo padrão PROFIBUS, além de uma série de curvas em que são apresentadas as saídas de um controle de posição com a malha sendo fechada através da referida

rede de comunicação em que são comparadas as diversas situações que podem ocorrer em relação às perdas de mensagens.

## 5.2 - A Plataforma de Hardware Utilizada na Implementação do Controle.

A implementação ideal deveria ser baseada integralmente na arquitetura proposta no capítulo anterior, entretanto, devido ao hardware disponível, isto não foi possível. Em contrapartida, para tal implementação, utilizou-se dois microcomputadores 486-DX-33Mhz, em que um deles desempenhava o papel de **estação controladora** e o outro, ora comportava-se como **estação sensora** ora como **estação atuadora**, estando as duas configuradas para operarem como mestres. Utilizou-se, ainda, uma rede de comunicação industrial padrão PROFIBUS, desenvolvida pela empresa alemã TMG I-tec Gesellschaft für Industrielle Informationstechnik mbH, e o sistema de aquisição de dados ADDA-10, responsável pela leitura da saída da planta quando a estação operava como sensora, e pela aplicação da ação de controle na planta quando esta operava como atuadora, além da própria planta descrita no capítulo III, como mostra a figura 5.1 abaixo.

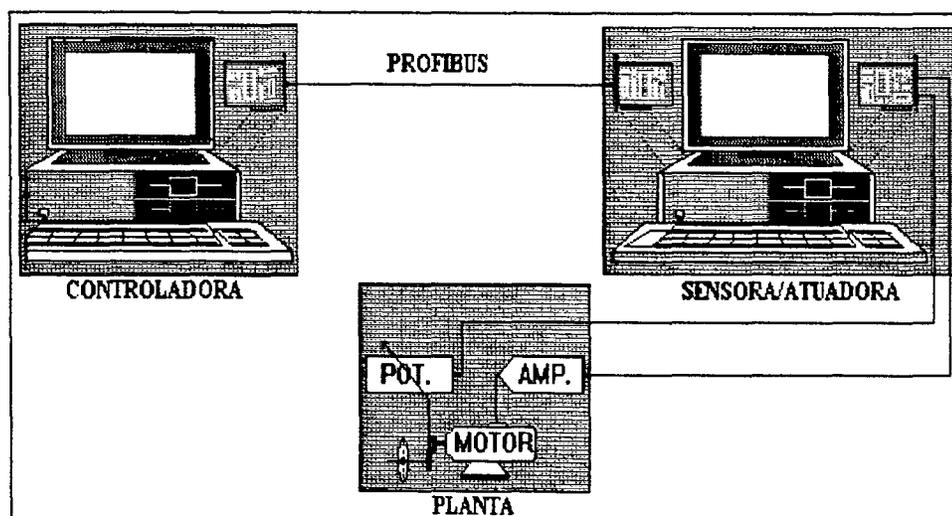


Figura 5.1 - Arquitetura utilizada na implementação prática

As placas da rede de comunicação PROFIBUS foram inseridas em um dos slots vagos de cada computador, compondo, assim, as estações como descrito acima. Cada uma das

placas é constituída de um microcontrolador 8051, memórias RAM e EPROM, uma dual-RAM e uma interface de comunicação RS-485, além de um hardware adicional para controle e sincronização da comunicação placa-host, como se observa na figura 5.2. Portanto, cada uma incorpora a **camada física** da rede e a **camada de enlace**, cujo protocolo está gravado na EPROM.

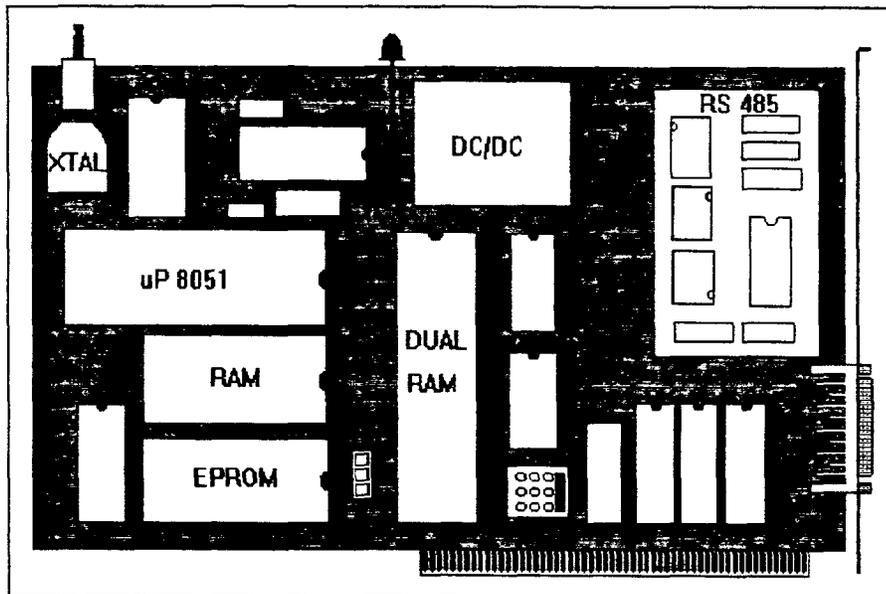


Figura 5.2 - Arquitetura da placa da rede de comunicação utilizada

Além disso, associado a esta placa, há um software especial, programado em linguagem C e que implementa uma interface entre a camada de enlace (gravada na EPROM) e a camada de aplicação a ser desenvolvida pelo usuário.

### **5.3 - Integração do Software de Controle-Predição Distribuído, Protocolo da Rede de Comunicação e Driver do Sistema de Aquisição de Dados.**

O software desenvolvido para a camada de aplicação e a interface entre a camada enlace, o controlador PID, o preditor nebuloso e o driver do sistema de aquisição de dados foram integrados à arquitetura descrita de acordo com a figura 5.3 abaixo.

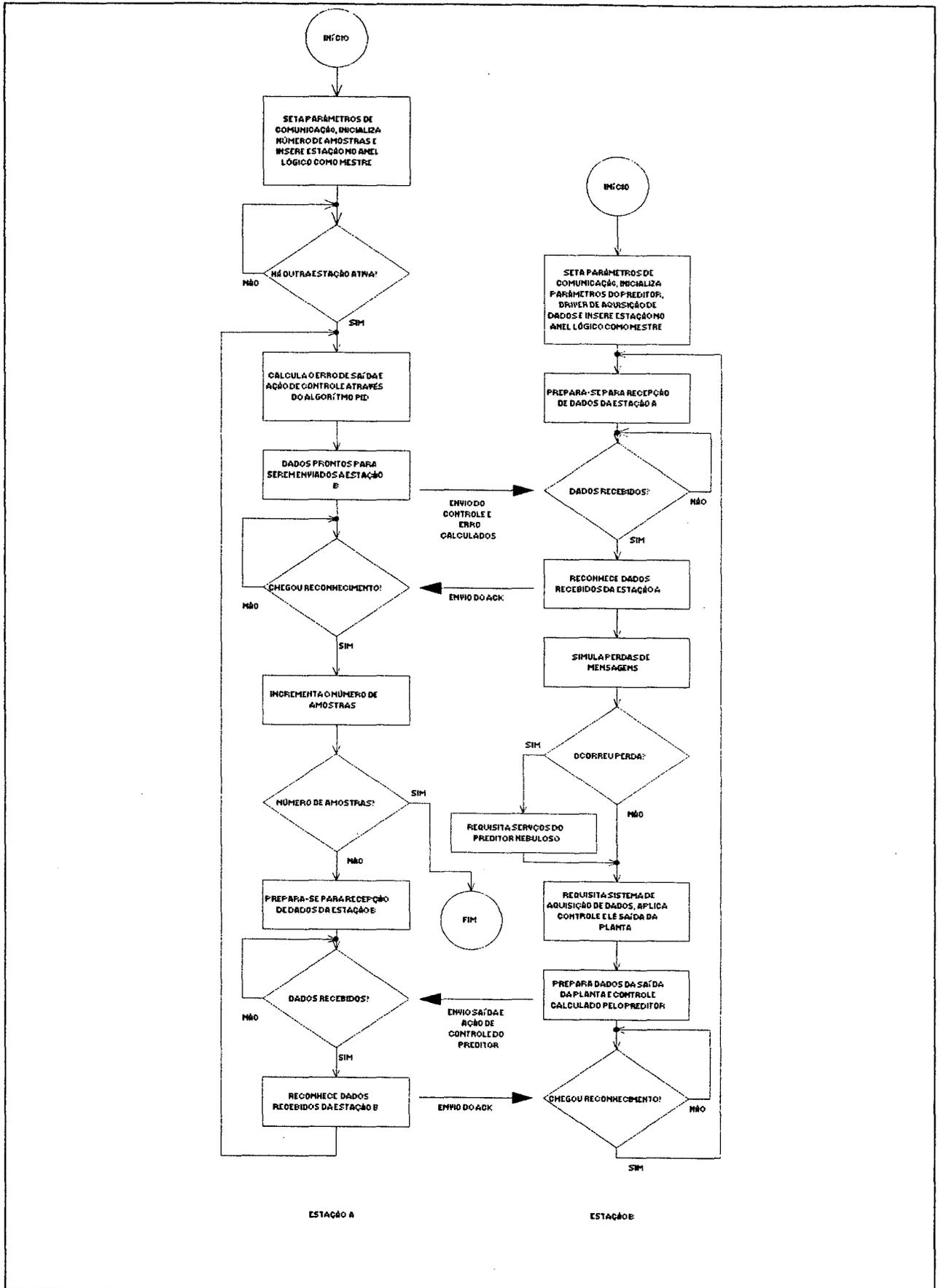


Figura 5.3 - Integração do software do sistema

Neste caso, observa-se que tanto na estação A como na estação B executa-se os módulos de interface com a camada de enlace e a aplicação a ser desenvolvida pelo usuário. As aplicações em cada camada, porém, são distintas: na estação A, tem-se o algoritmo de controle PID e, na estação B, executa-se o preditor nebuloso da ação de controle e driver do sistema de aquisição de dados.

#### 5.4 - Os Tempos de Resposta da rede PROFIBUS.

Os resultados apresentados nesta seção são referentes à medição de tempos de resposta para serviços confirmados e não-confirmados do protótipo PROFIBUS a nível da camada de enlace de dados. Sendo assim, no primeiro caso, a figura 5.4 apresenta os resultados obtidos para o serviço confirmado do PROFIBUS (SDA - Send Data with Acknowledge), com as duas estações configuradas como mestres, operando a uma taxa de transmissão de 500 Kbit/s e usando como meio de transmissão um par de fios trançados.

Os resultados foram obtidos em função de parâmetros da rede, tais como o maior endereço das estações (HSA - Highest Station Address), o tempo de rotação desejado para o "token" ( $T_{TR}$  - Target Rotation Time), mantendo-se o parâmetro  $G = 1$  fixo.

Os parâmetros acima têm seus valores atribuídos em tempo de configuração do sistema, sendo que o tempo de rotação desejado para o "token" ( $T_{TR}$  - Target Rotation Time) é o tempo de reação do sistema no círculo lógico necessário para a aplicação. No protótipo utilizado, ele estava limitado a valores compreendidos entre 1 e 65535 bits (ou  $1/500 = 0.002$  mS e  $65535/500 = 131.07$  mS).

O parâmetro  $G$ , que de acordo com a norma pode assumir valores compreendidos entre 1 e 100, no protótipo utilizado teve seu valor fixado em 1 (um). Este parâmetro permite uma relação de proporcionalidade entre o  $T_{TR}$  e o tempo de atualização da GAP ( $T_{GUD}$  - GAP Update Time) dada por:  $T_{GUD} = G.T_{TR}$ , sendo este o tempo destinado a estação ativa para inicializar a atualização da GAP (lista de estações ativas conectadas ao barramento).

O maior endereço de estação (HSA - Highest Station Address) no protótipo utilizado poderia ter valores compreendidos entre 2 e 32 , e ele é necessário para permitir ao sistema conhecer a estação com o maior endereço conectada ao barramento, além do máximo número de estações que podem ser conectadas ao mesmo.

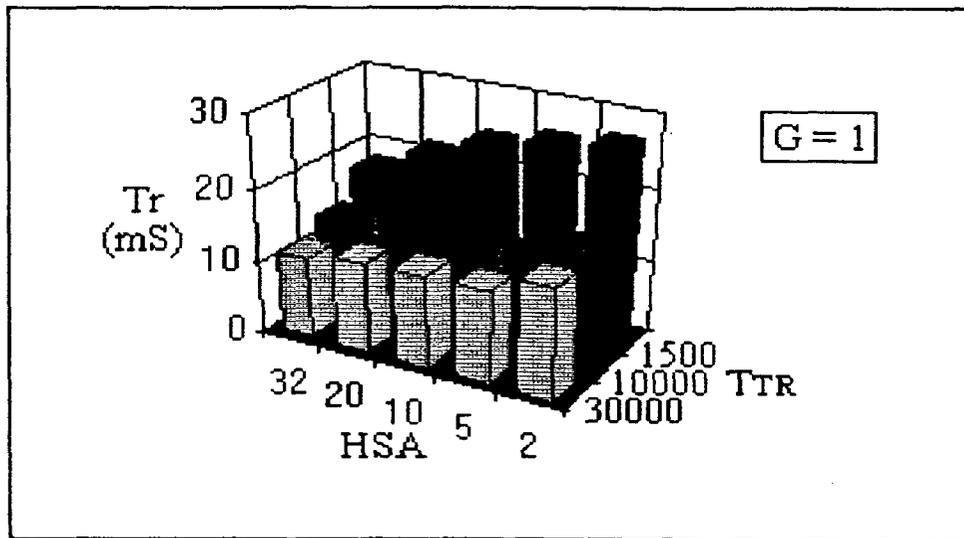


Figura 5.4 - Tempos de resposta para SDA

O tamanho do dado transmitido foi de 13 (treze) bytes. Este comprimento foi tomado pelo fato de que ele é o tamanho necessário para se enviar, da estação A até a B, a ação de controle e o erro de saída da planta calculado, bem como fazer a operação inversa, enviando da estação B para a A a leitura da saída da planta e o valor da ação de controle predito. Estes dois valores, independente da estação considerada, são dois números em ponto flutuante concatenados em uma string para formar uma única mensagem através do uso de alguns caracteres de controle.

Neste caso, observa-se que os tempos de resposta do sistema são dependentes dos parâmetros descritos anteriormente e seus valores variam consideravelmente com alterações sofridas nos mesmos. Assim, com o tempo desejado para a rotação do "token" (TTR) e fator de atualização da GAP ( $G$ ) fixos, o tempo de resposta diminui na proporção em que o maior endereço da estação conectada ao barramento (HSA) aumenta; e, por outro lado, o tempo de resposta aumenta quando HSA e  $G$  são mantidos fixos e TTR diminui.

Uma explicação para os fatos acima pode ser feita com base em:

- no primeiro caso, o tempo de resposta diminui devido a busca, pela estação detentora do "token", por alguma estação que poderia estar conectada ao barramento para atualização da sua lista de estações ativas. Neste caso, como a estação não é encontrada, o "token" é mantido até o final da transmissão, possibilitando um melhor aproveitamento do seu uso. Nesta medida, o endereço da estação B foi sempre mantido com valor igual a 1 (um) e variou-se o endereço da estação A até o limite máximo desejado.

- no segundo caso, o tempo de retenção do "token" sendo pequeno, determinará um grande número de atualizações da lista de estações ativas, além de impor várias transferências do mesmo (token) entre as duas estações durante a transmissão de uma mensagem por parte de uma delas.

A figura 5.5 apresenta os tempos de resposta para o serviço não confirmado (SDN - Send Data with No Acknowledge) considerando as mesmas condições feitas para o outro serviço. Os demais serviços oferecidos não tiveram seus tempos de respostas medidos por não estarem completamente implementados no protótipo utilizado.

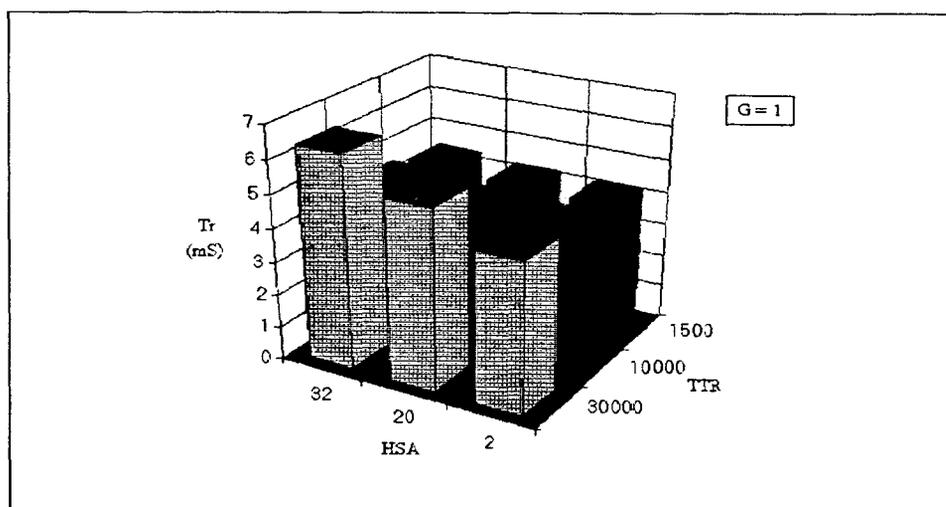


Figura 5.5 - Tempos de resposta para SDN

Observa-se, neste caso, que a dependência entre os tempos de resposta e os parâmetros da rede ocorrem de forma inversa àquela do serviço SDA. Assim, com o tempo desejado para a rotação do "token" (TTR) e fator de atualização da GAP (G) fixos, o tempo de resposta aumenta na proporção em que o maior endereço da estação conectada ao barramento (HSA) aumenta; e, por outro lado, o tempo de resposta diminui quando HSA e G são mantidos fixos e TTR diminui.

Os tempos de resposta obtidos incluem apenas duas camadas (Física e Enlace de Dados) e, certamente, seriam bastantes superiores caso a mesma medição fosse realizada utilizando os serviços propostos para a camada de aplicação do PROFIBUS.

Em função das medições efetuadas nos dois casos, observa-se que a performance do PROFIBUS é tal que limita sua aplicação ao controle em malha fechada de grandezas do controle de processo e de algumas grandezas da manufatura com baixa dinâmica.

Uma melhora desta performance deverá ser propiciada pelo uso de "chips" integrados que implementam as funcionalidades da rede, como é o caso do processador multi-protocolo PROFIBUS da Motorola, Inc. MC68302 [MULT90].

### **5.5 - Resultados e Gráficos obtidos para o Controle de Posição.**

Os resultados apresentados em seguida foram obtidos para o controle de posição com e sem perdas ou danos de telegramas na rede de comunicação para diversos valores de referência (Set Points) e ganhos do controlador PID.

A planta a ser controlada admitia um período de amostragem máximo de 37 mS de acordo com os critérios de escolha apresentados no capítulo III. Entretanto, o valor de 35 mS foi tomado para esta implementação por permitir processar o serviço confirmado (SDA), o driver do sistema de aquisição de dados, e os algoritmos do controlador e do preditor, além de, por ser um valor que se encontra próximo ao limite máximo, permitir observar mais facilmente a degradação do controle quando ocorresse uma perda de mensagem correspondente à ação de controle.

Desta forma, cada curva da figura 5.6 apresenta uma situação específica de ganhos do controlador PID e do valor de referência (Set-Point) desejado, isto é: ( $K_1=12$ ,  $K_2=21.5$ ,  $K_3=9.5$  e  $SP=100^\circ$  para as curvas A, D e G,  $K_1=10$ ,  $K_2=17.9$ ,  $K_3=7.9$  e  $SP=80^\circ$  para as curvas B, E e H,  $K_1=5$ ,  $K_2=8.95$  e  $K_3=3.95$  e  $SP=50^\circ$  para as curvas C, F e I). Além disso, observa-se que para cada gráfico (I, II e III) são fornecidas 3 (três) curvas, a saber:

- as curvas de resposta do sistema com o controlador PID executando-se na estação A, sem perdas de mensagens (gráfico I);
- as curvas de resposta com o controlador PID na estação A, com perdas de mensagens e sem nenhum mecanismo de predição da ação de controle (gráfico II);
- as curvas de resposta com o PID em A, com 20% de probabilidade de ocorrerem até uma perda e 5% de até duas perdas de mensagens, com o algoritmo de predição de controle rodando na estação B em paralelo com o algoritmo PID em A (gráfico III).

As perdas foram simuladas por software, sendo que medições efetuadas em ambientes industriais indicam uma taxa real de perdas de mensagens da ordem de 0.5% [Stemm91], portanto bastante inferior à assumida neste trabalho.

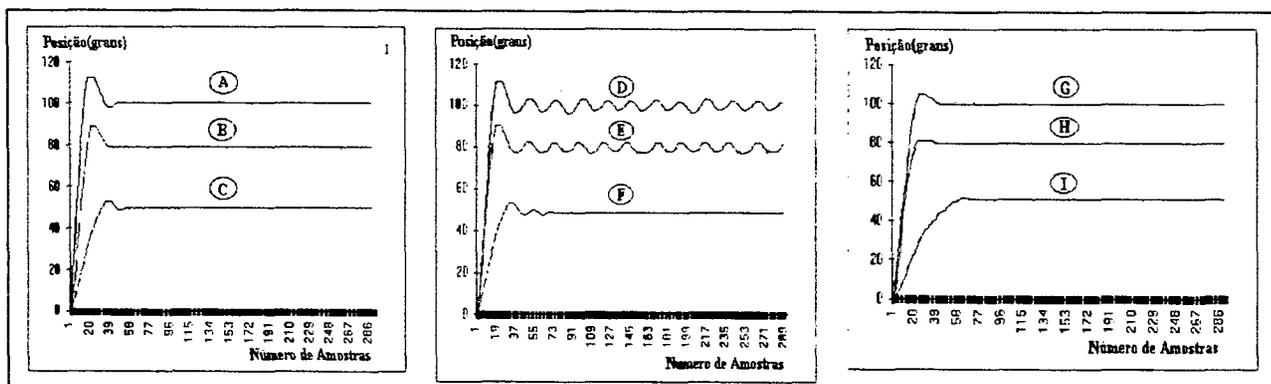


Figura 5.6 - Saídas com e sem perdas de mensagens para três referências e ganhos do PID.

A figura 5.7 apresenta, por sua vez, as 9 (nove) curvas de saída de posição da planta sobrepostas, para permitir a comparação das mesmas quando se variam os ganhos do PID e as referências desejadas.

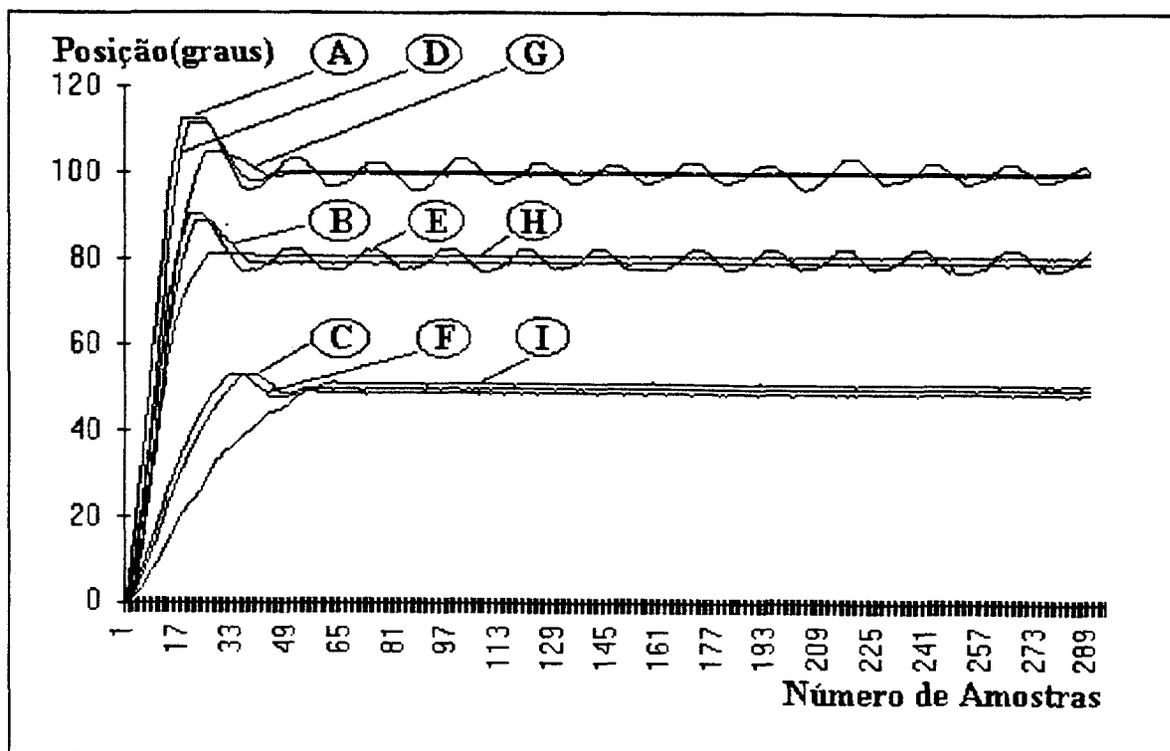


Figura 5.7 - Curvas de saída de posição para 9 (nove) situações distintas.

Observa-se nas figuras, por um lado, que a perda de mensagens tornam o sistema oscilatório para ganhos do PID mais elevados e, por outro, que quando não se tem incorporado ao controlador principal o preditor nebuloso e apesar deste não proporcionar uma excelente precisão ao controle, ele atua de forma que o sobrepico atingido é menor e a saída do sistema se mantém dentro dos limites de erros permitidos para a maioria dos sistemas de controle industriais.

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSÃO GERAL

As redes de comunicação aplicadas no controle industrial proporcionam uma série de vantagens, entre as quais a possibilidade de integração entre os processos de fabricação do mesmo nível, o controle multimalhas e a integração do nível mais baixo da hierarquia fabril com os demais níveis hierárquicos, segundo a filosofia CIM. Dessa forma, as propostas de padronização de redes para aplicações industriais levam em conta estes fatos e propõem arquiteturas reduzidas, mas que são compatíveis com o modelo de referência OSI/ISO.

Entretanto, devido ao fato das exigências de tempo real deste nível serem bastante críticas, o sistema de comunicação a ser empregado fica obrigado a possuir características específicas de alta performance, sob pena de não contemplar completamente o perfil desejado, deixando de atender uma gama de aplicações importantes.

A análise de performance das redes "Fieldbus" mostra que, quanto maior a compatibilidade com o modelo de referência OSI/ISO, menor é a sua capacidade de atender aplicações críticas no tempo, tais como controle em malha fechada de grandezas de alta dinâmica em máquinas ferramentas, em robôs industriais e em grande parte da automação da manufatura. Os valores de tempos de resposta apresentados no capítulo II e medidos no capítulo V confirmam tal afirmação. Em consequência disso, e de forma paralela aos trabalhos dos grupos do IEC que tentam chegar a um possível padrão internacional para redes "Fieldbus", uma série de redes de comunicação (BITBUS, CAN, VAN, SERCOS, etc) com protocolos simples e integrados em hardware para proporcionarem um menor "overhead", mas que, por outro lado, apresentam pouca ou nenhuma compatibilidade com padrões definidos para os níveis superiores, como o MAP por exemplo, possuem tempos de resposta compatíveis com as exigências da dinâmica dessas grandezas.

Neste caso, observa-se que a proposta do padrão de rede de comunicação para o nível de "chão de fábrica" encontra hoje uma série de limitações de natureza temporal e corre o sério risco de, ao ficar pronta, não atender as exigências para as quais foi concebida, como, aliás, aconteceu com a proposta MAP, que, apesar das novas versões implementadas, tem suas aplicações restritas, no máximo, ao nível de célula da hierarquia fabril.

Sendo assim, os trabalhos com estas redes, que apresentam altas performances, começam a indicar uma perspectiva de solução para estações simples como sensores e atuadores, cujas funções são restritas ao próprio processo, qual seja, implementá-las com protocolos capazes de lhes fornecerem uma característica de alta performance, sem que as mesmas sejam compatíveis com o modelo OSI/ISO, deixando esta compatibilidade a cargo somente das estações que incorporam os algoritmos de controle ou comando que, neste caso, desempenhariam as funções de ponte.

Associado à questão de performance, existe o fato de que, no controle discreto de grandezas em malha fechada, como apresentado no capítulo III, exige-se o cumprimento rigoroso do período de amostragem. Acrescente-se a isso o fato de que, nos casos em que a malha é fechada com uma rede de comunicação, cujo objetivo principal, geralmente, é controlar mais que uma malha, e, para tanto, procura-se escolher os maiores períodos de amostragens permitidos para as grandezas, fica evidente que se ocorrer uma perda de mensagem, correspondente à leitura da saída do processo ou a ação de controle enviada para o mesmo, irá ocorrer uma degradação do controle fazendo com que a saída nem sempre fique dentro dos limites tolerados pela precisão exigida.

Para amenizar os efeitos das perdas de mensagens, é proposto, no capítulo IV, uma estratégia de predição da ação de controle baseada em lógica nebulosa. Esta proposta evolui para o nível de implementação do referido preditor, cujos ajustes na base de conhecimentos foram feitos a nível de simulação, através do modelo matemático do processo que, neste caso e para a maioria das grandezas da automação da manufatura, é de fácil obtenção, como foi apresentado no capítulo III, visto que os processos a serem controlados neste nível utilizam servomotores

---

DC, que constituem sistemas lineares em que a função de transferência é muito simples de se obter.

Além disso, os resultados práticos obtidos e apresentados no capítulo V, quando todos os algoritmos de controle, módulos de aquisição de dados e comunicação são integrados à rede de comunicação, mostram que a saída do sistema é perfeitamente estável mesmo em caso de perdas de mensagens, encorajando futuros trabalhos nesta área.

O preditor nebuloso aqui implementado pode ter uma significativa melhora de performance, em relação ao tempo de execução, se for utilizado uma ferramenta capaz de ajustar as regras de controle necessárias, reduzindo substancialmente o seu número. Além disso, este preditor abre a possibilidade de, em futuros trabalhos, permitir efetuar o controle em malha fechada de grandezas da automação da manufatura com dinâmicas elevadas, utilizando-se os serviços não confirmados das redes de comunicação apresentadas no capítulo II, cujos tempos de resposta são significativamente inferiores aos dos serviços confirmados.

Por outro lado, o controle implementado e apresentado neste trabalho, em função do hardware e das limitações da rede de comunicação utilizada, não permitiu a realização de um controle multimalhas de grandezas da manufatura, como posição e velocidade, por exemplo, que era almejado no início dos trabalhos, sendo, portanto, mais uma das possibilidades a ser explorada em futuros trabalhos, em que outros tipos de redes de comunicação devem ser utilizadas. Sugere-se, por exemplo, testes baseados nas redes FIP, CAN e, quando disponível, na rede ISA/SP 50.

## Referências Bibliográficas.

- [Aguia89] AGUIAR, M. W. C., *"Análise Comparativa de Desempenho da Camada de Enlace de Dados do PROFIBUS e do FIP, Propostas Candidatas ao Padrão Fieldbus"*. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, Novembro 1989.
- [Astro90] ASTRÖM, K. J. WITTENMARK B., *"Computer-Controlled Systems, Teory and Design"*. Second Edition, Prentice-Hall International, Inc., N. J., USA, 1990.
- [Azeve93] AZEVEDO, H. R., BRANDÃO, S. F. M., ALVES, J. B. M., *"A Load Insensitive Fuzzy Logic Controlled Positioner"*. 1º Simpósio Brasileiro de Automação inteligente, UNESP, Rio Claro-SP, Brasil, 1993.
- [Barcz93] BARCZAK, C. L., ROSA, L.C., KRAMBECK, C. P., MARTIN, C.A., *"Controlador de Lógica Nebulosa para Posicionadores em Máquina-Ferramenta"*. 1º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, UNESP, Rio Claro-SP, Brasil, 1993.
- [Bitbu87] *"BITBUS Interconnect Specification"*. Intel Corporation, 1987.
- [Bruci86] BRUCIAPAGLIA, A. H., APOLÔNIO R., *"Uma Estratégia de Eliminação da Sobrecarga da Ação Integral para Controladores PID discretos: Aplicação no Controle de Velocidade de um Motor CC"*. 2º Congresso LatinoAmericano de Control Automatico, Buenos Aires, 1986.
- [Caval94] CAVALCANTE, Carla M. C., *"Sistema de Navegação para Helicópteros Não-Tripulados Utilizando Controlador Nebuloso"*. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, Junho 1994.
- [DIN188] DIN V 19245, Teil 1: *"PROFIBUS; Übertragungstechnik, Buszugriff- und Übertragungsprotokoll, Dienstschnittstelle zur Anwendungsschicht, Management"*. Beuth- Verlag, Berlin, Deutschland, 1988.

- 
- [DIN288] DIN 66 348. Teil 2: *"Schnittstellen und Steuerungsverfahren für die serielle Messdatenübermittlung - Mehrpunktverbindung"*. Berlin, Deutschland, 1988.
- [Etseh92] ETSEHBERGER, Konrad. *"CAN in der industriellen Steuerungstechnik"*. Eletronik plus, Franzis-Verlag GmbH & Co. KG, München, Deutschland, 1992, pp 50-53.
- [FIP93] FIP, CLUB., *"FIP Technical Description - A Genuine Open Fieldbus Network"*. France, 1993.
- [FIP88] *"Systeme FIP: Couche Liason de Donees et Specification des Services Couche Application"* - Draft 3, Norme Experimentale, France, 1988.
- [Godd90] GÖDDERTZ, J., *"PROFIBUS - Technical Publication for Industry and Commerce"*. Klockner Moeller, Bonn, Germany, October 1990.
- [ISA190] *"Industrial Automation Systems - Systems Integration and Communications - Fieldbus Part 2 - Physical Layer"*. Editors Draft - Version 5 - Instrument Society of America, USA.
- [ISA291] *"Industrial Automation Systems - Systems Integration and Communications - Fieldbus Part 3 - Data Link Service Definition"*. Editors Draft - Version 7 - Instrument Society of America, USA.
- [ISA391] *"Industrial Automation Systems - Systems Integration and Communications - Fieldbus Part 4 - Data Link Protocol Definition"*. Editors Draft - Version 7 - Instrument Society of America, USA.
- [ISO1 88] *"International Organization for Standartization ISO/DIS 9506-1. Manufaturing Message Specification, Part 1: Service definition"*. 1988.
- [ISO2 88] *"International Organization for Standartization ISO/DIS 9506-1. Manufaturing Message Specification, Part2: Protocol specification"*. 1988.

- [Jia93] JIA, L. M., ZHANG, X. D., *"On Fuzzy Multiobjective Preceptive Control an it's Adaptative Alternative"*. 12th World Congress IFAC, Sidney, Austrália, Vol. 10, July 1993.
- [Lawre90] LAWRENZ, Wolfhard. *"Auto-Busse in der Industrie - Einsatz bei der feldbus- und Sensor/Aktorvernetzung"*. *Elektronik*, Deutschland, 12/8. 6. 1990, pp 134-137.
- [Liaw91] LIAW, C. M., WANG, J. B., *"Design and Implementation of a Fuzzy Controller for a High Performance Induction Motor Drive"*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 21, N° 4, 1991.
- [Lima91] LIMA, S. C., *"Identificação de Sistemas Assistida por Computador"*. Tese de Mestrado, LCMI, UFSC, 1991.
- [MAP87] MAP/TOP., *"Users Group of SME, Manufacturing Automation Protocol"*. Version 3.0, July 1987.
- [Mende91] MENDES, M., *"Redes de Chão de Fábrica e o Projeto Field-Bus"*. CONSAI S/C, São Paulo, Brasil, Junho 1991.
- [MÚLT90] *"MC68302 IMP Integrated Multi-Protocol Processor - PROFIBUS"*. Motorola, Inc., June 28th, 1990.
- [Ogata70] OGATA, K., *"Modern Control Engineering"*. Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA, 1970.
- [Reuss93] REUSS, H. C., *"Controller Area Network (CAN) - A Powerful Solution for Fieldbus Applications"*. Application Note, Philips Semiconductors, May 1993.
- [Salom94] SALOMÃO, João M., STEMMER, Marcelo R., *"A Strategy of Fuzzy Prediction for a Positioner Control Whose Feedback-Loop is done through a Fieldbus System"*. BRAZIL - JAPAN Joint Symposium on Fuzzy Systems, Campinas-SP, Brazil, July 1994.

- 
- [Sebor89] SEBORG, D. E., EDGAR, T.F., MELLICHAMP, D. A., *"Process Dynamics and Control"*. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., USA, 1989.
- [Stemm91] STEMMER, M. R., *"Einsatzmöglichkeiten digitaler Feldbussysteme in geschlossenen, maschineninternen Regelkreisen"*. Tese de Doutorado, WZL/RWTH, Aachen, 1991.
- [Tanen89] TANENBAUM, Andrew S., *"Computers Networks"*. Prentice-Hall International, Inc, USA, 1989.
- [Viot93] VIOT, G., *"Fuzzy Logic in C - Creating a fuzzy-based inference engine"*. Dr. Dobb's Journal - Software Tools for the Professional Programmer, M&T Publication, # 197, February 1993.
- [Winki92] WINKIER, Heribert., *"Digital-Interface für Regelkreise - Sercos auf dem Weg zum Standard"*. Eletronik Plus, Franzis-Verlag GmbH & Co. KG, München, Deutschland, 1992, pp 118-123.
- [Zadeh73] ZADEH, L. A., *"Outline of a New Approach to the Analysis of Complex and Decision Processes"*. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3, N° 1, 1973.
- [Zadeh65] ZADEH, L. A., *"Fuzzy Sets"*. Information Control, N° 8, pp. 338-353, 1965.
- [Zimm80] ZIMMERMANN H., *"OSI Reference Model: The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection"*. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-28, N° 4, April 1980, pp 425-432.