

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA :

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DA CAMADA ENLACE DE DADOS
DO PROFIBUS E DO FIP, PROPOSTAS CANDIDATAS AO PADRÃO
"FIELD-BUS"

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

MARCOS WILSON COSTA DE AGUIAR

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1989.

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DA CAMADA ENLACE DE DADOS DO
PROFIBUS E DO FIP, PROPOSTAS CANDIDATAS AO PADRÃO "FIELD-BUS"

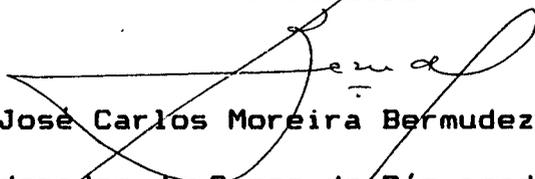
MARCOS WILSON COSTA DE AGUIAR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO.



Prof. Jean-Marie Farines, Dr. Ing.

Orientador



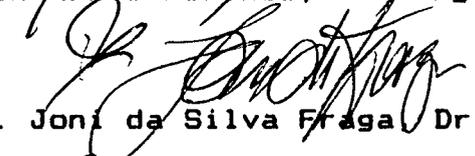
Prof. José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.

Coordenador do Curso de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica

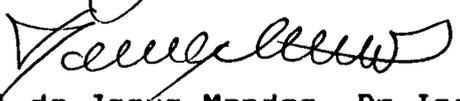
Banca Examinadora



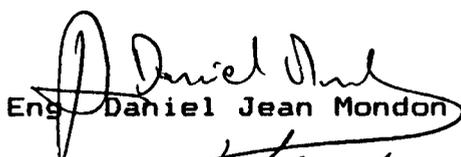
Prof. Jean-Marie Farines, Dr. Ing.



Prof. Joni da Silva Fraga, Dr.



Prof. Manuel de Jesus Mendes, Dr. Ing.



Eng. Daniel Jean Mondon



Prof. Hari Bruno Mohr, Dr.

À minha esposa

Aos meus pais

Aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos:

- ao Dr. G. Graeme Wood, pelas informações fornecidas sobre o andamento dos trabalhos na IEC;
- ao Sr. Udo Fritzke Junior, pela sua valiosa contribuição na execução das simulações e críticas aos modelos em Redes de Petri;
- às Srtas. Rosiane Vilhena Vaz de Mello, Margibel Adriana de Oliveira e Marileia Goulart, pelos múltiplos e repetitivos trabalhos de digitação e criação de originais;
- ao Prof. Jean-Marie Farines, pelo trabalho de orientação;
- aos Professores Manuel de Jesus Mendes, Joni da Silva Fraga, Hari Bruno Mohr e ao Eng^o Daniel Jean Mondon, membros da banca examinadora, pelas sugestões e contribuições fornecidas ao trabalho.

Enfim, agradecemos a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a consecução deste trabalho.

S U M Á R I O

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| GLOSSÁRIO..... | xiv |
| RESUMO..... | xxii |
| ABSTRACT..... | xxiii |
| <u>1 - INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| <u>2 - CONTEXTO DO ESTUDO</u> | 3 |
| 2.1 - Introdução..... | 3 |
| 2.2 - Caracterização..... | 6 |
| 2.2.1 - Definição..... | 6 |
| 2.2.2 - Histórico..... | 6 |
| 2.2.3 - Características..... | 8 |
| 2.2.3.1 - Requisitos das aplicações..... | 9 |
| 2.2.3.2 - Dispositivos interligados..... | 10 |
| 2.2.3.3 - Fluxo de informação..... | 11 |
| 2.3 - Implicações do "field-bus"..... | 12 |
| 2.4 - Contexto dos trabalhos e padronização..... | 14 |
| 2.4.1 - Requisitos funcionais..... | 15 |
| 2.4.2 - Propostas candidatas à padronização e tendências..... | 20 |
| 2.5 - Conclusão..... | 30 |
| <u>3 - CRITÉRIOS E METODOLOGIA</u> | 32 |
| 3.1 - Introdução..... | 32 |
| 3.2 - O estudo de desempenho..... | 32 |
| 3.2.1 - Objeto da avaliação..... | 33 |
| 3.2.2 - Estratégia de medição de desempenho..... | 33 |
| 3.2.2.1 - Modelo..... | 34 |
| 3.2.2.2 - Elementos da avaliação de desempenho..... | 37 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.3 - Metodologia..... | 39 |
| 3.2.3.1 - Critérios para a análise operacional..... | 40 |
| 3.2.3.2 - Critérios para a análise temporal..... | 42 |
| 3.2.3.3 - Relação com os elementos de desempenho..... | 49 |
| 3.3 - PROFIBUS..... | 55 |
| 3.3.1 - Análise operacional..... | 55 |
| 3.3.1.1 - Arquitetura..... | 55 |
| 3.3.1.2 - Serviços..... | 58 |
| 3.3.1.3 - Controle de erros..... | 65 |
| 3.3.2 - Análise temporal..... | 66 |
| 3.3.2.1 - Tempos de usuário..... | 67 |
| 3.3.2.2 - Tempos internos..... | 69 |
| 3.3.2.3 - Análise dos serviços..... | 75 |
| 3.3.2.4 - Controle de ocupação do barramento..... | 76 |
| 3.4 - FIP..... | 78 |
| 3.4.1 - Análise operacional..... | 78 |
| 3.4.1.1 - Arquitetura..... | 78 |
| 3.4.1.2 - Serviços..... | 81 |
| 3.4.1.3 - Controle de erros..... | 91 |
| 3.4.2 - Análise temporal..... | 93 |
| 3.4.2.1 - Tempos do usuário..... | 93 |
| 3.4.2.2 - Tempos internos..... | 96 |
| 3.4.2.3 - Análise dos serviços..... | 101 |
| 3.4.2.4 - Controle de ocupação do barramento..... | 101 |
| 3.5 - Análise Preliminar..... | 102 |
| 3.5.1 - Restrições e Indefinições..... | 102 |
| 3.5.1.1 - PROFIBUS..... | 103 |
| 3.5.1.2 - FIP..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| 3.5.2 - Focalização da análise de desempenho..... | 108 |
| 3.5.2.1 - Análise dos resultados..... | 108 |
| 3.5.2.2 - Análise dinâmica de desempenho..... | 109 |
| 3.5.2.3 - Análise de implicações sobre o modelo de desempenho..... | 110 |
| 3.6 - Conclusão..... | 111 |
| 4 - <u>ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO</u> | 113 |
| 4.1 - Introdução..... | 113 |
| 4.2 - Modelagem..... | 115 |
| 4.2.1 - Metodologia de Modelagem..... | 115 |
| 4.2.1.1 - Técnica de geração dos modelos..... | 115 |
| 4.2.1.2 - Estratégia de incorporação do erro de transmissão..... | 117 |
| 4.2.2 - Modelagem dos serviços..... | 118 |
| 4.2.2.1 - PROFIBUS..... | 121 |
| 4.2.2.2 - FIP..... | 125 |
| 4.3 - Critérios e metodologia de simulação..... | 127 |
| 4.3.1 - Condições de simulação..... | 127 |
| 4.3.1.1 - Modelos individuais..... | 129 |
| 4.3.1.2 - Modelos combinados..... | 131 |
| 4.3.2 - Limites do estudo..... | 137 |
| 4.3.2.1 - Modelagem..... | 137 |
| 4.3.2.2 - Simulação..... | 140 |
| 4.4 - Análise detalhada dos resultados..... | 142 |
| 4.4.1 - Capacidade de transmissão..... | 143 |
| 4.4.1.1 - PROFIBUS..... | 143 |
| 4.4.1.2 - FIP..... | 144 |
| 4.4.1.3 - Análise comparativa..... | 146 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.2 - Perdas finais..... | 147 |
| 4.4.2.1 - PROFIBUS..... | 148 |
| 4.4.2.2 - FIP..... | 151 |
| 4.4.2.3 - Análise comparativa..... | 154 |
| 4.4.3 - Eficiência da transferência de informação..... | 155 |
| 4.4.3.1 - PROFIBUS..... | 155 |
| 4.4.3.2 - FIP..... | 156 |
| 4.4.3.3 - Análise comparativa..... | 159 |
| 4.4.4 - Serviço periódico..... | 160 |
| 4.4.4.1 - Tempo de execução do serviço periódico (t_P)... | 160 |
| 4.4.4.2 - Tempo de reação do sistema (t_{SR})..... | 166 |
| 4.4.5 - Serviço aperiódico..... | 170 |
| 4.4.5.1 - PROFIBUS..... | 171 |
| 4.4.5.2 - FIP..... | 174 |
| 4.4.5.3 - Análise comparativa..... | 181 |
| 4.5 - Análise comparativa geral..... | 182 |
| 4.5.1 - Síntese dos resultados de desempenho..... | 182 |
| 4.5.1.1 - Capacidade de transmissão (Q_u)..... | 182 |
| 4.5.1.2 - Perdas finais (P_f)..... | 184 |
| 4.5.1.3 - Eficiência da transferência de informação ($E\%$) | 184 |
| 4.5.1.4 - Serviço periódico..... | 185 |
| 4.5.1.5 - Serviço aperiódico..... | 186 |
| 4.5.1.6 - Comparação geral..... | 188 |
| 4.5.2 - Relação com o modelo de desempenho..... | 189 |
| 4.5.3 - Implicações sobre aplicações..... | 194 |
| 4.5.3.1 - FIP..... | 194 |
| 4.5.3.2 - PROFIBUS..... | 197 |
| 4.5.4 - Alternativa para camada enlace..... | 201 |

| | |
|--|------|
| 4.6 - Conclusão..... | 205 |
| 5 - <u>CONCLUSÃO</u> | 207 |
| 6 - <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> | 211 |
| 6.1 - Esforços de Padronização..... | 211 |
| 6.2 - Análise do Contexto e Conceitos Gerais..... | 222 |
| 6.3 - Análise de Desempenho..... | 224 |
| 6.4 - Bibliografia Básica Complementar..... | 227 |
| 6.5 - Documentos Intermediários Gerados..... | 230 |
| 7 - <u>ANEXOS</u> | A-1 |
| 7.1 - Análise Temporal dos Serviços do PROFIBUS e do FIP.. | A-2 |
| 7.2 - Redes de Petri (RdP)..... | A-34 |
| 7.3 - Descrição Sucinta do ARP..... | A-40 |
| 7.3 - Modelos em RdPTE..... | A-42 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | - Estrutura funcional do sistema de produção industrial - requisitos de comunicação..... | 3 |
| 2.2 | - Hierarquia de comunicação fabril..... | 4 |
| 2.3 | - Exemplo de aplicação do "field-bus" [IEC386]..... | 5 |
| 2.4 | - Função do "field-bus"..... | 7 |
| 2.5 | - Tabela de requisitos Automação da Manufatura/ Controle de Processos..... | 9 |
| 2.6 | - Tabela de características gerais de dispositivos [DECO87]..... | 10 |
| 2.7 | - Modelo de referência [ISA187]..... | 15 |
| 2.8 | - Tabela de requisitos funcionais do "field-bus"..... | 17 |
| 2.9 | - Tabela comparativa das candidatas a "field-bus"..... | 21 |
| 2.10 | - "Field-bus" em controle realimentado de processos [EURE87]..... | 27 |
| 3.1 | - Modelo do desempenho da camada enlace..... | 35 |
| 3.2 | - Modelo de descrição dos serviços..... | 41 |
| 3.3 | - PROFIBUS - Modelo básico do serviço..... | 42 |
| 3.4 | - FIP - Modelo básico do serviço..... | 43 |
| 3.5 | - Tempos do serviço periódico..... | 52 |
| 3.6 | - PROFIBUS - Anel lógico..... | 56 |
| 3.7 | - PROFIBUS - Serviços da camada enlace..... | 60 |
| 3.8 | - PROFIBUS - Formato dos "frames"..... | 65 |
| 3.9 | - PROFIBUS - Identificação dos "frames"..... | 66 |
| 3.10 | - PROFIBUS - Time-slot (t_{ML})..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| 3.11 - PROFIBUS - Exemplos de aplicação de t_{eL} | 72 |
| 3.12 - FIP - Mecanismo de acesso ao meio..... | 79 |
| 3.13 - FIP - Arquitetura da camada enlace..... | 82 |
| 3.14 - FIP - Etapas do ciclo elementar [THOM87]..... | 84 |
| 3.15 - FIP - Macro-ciclo..... | 86 |
| 3.16 - FIP - Serviços da camada enlace..... | 88 |
| 3.17 - FIP - Formato do "frame"..... | 91 |
| 3.18 - FIP - Tipos de "frames"..... | 92 |
| 3.19 - FIP - Distribuição das entidades no meio físico..... | 97 |
| 3.20 - FIP - "Time-outs" t_0 e t_1 | 98 |
| 4.1 - Técnica de geração dos modelos em RdPTE..... | 116 |
| 4.2 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do serviço SDA..... | 119 |
| 4.3 - Grafo de classe de estado do serviço SDA..... | 122 |
| 4.4 - PROFIBUS - Tabela dos modelos em RdPTE dos serviços..... | 124 |
| 4.5 - FIP - Tabela dos modelos em RdPTE dos serviços..... | 126 |
| 4.6 - PROFIBUS - Tabela de capacidade de transmissão (Q_u)..... | 143 |
| 4.7 - FIP - Tabela de capacidade de transmissão (Q_u)..... | 145 |
| 4.8 - PROFIBUS - Gráficos de perdas finais dos serviços SDA, SRD, RDR..... | 150 |
| 4.9 - PROFIBUS - Gráficos de perdas finais da transferência do "token"..... | 150 |
| 4.10 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço (TB)..... | 151 |
| 4.11 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço SDA e da sua fase MA..... | 152 |
| 4.12 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço SDN e da sua fase MN)..... | 153 |
| 4.13 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço UP e da sua fase RETB..... | 153 |

| | |
|---|-----|
| 4.14 - PROFIBUS - Gráficos de eficiência dos serviços..... | 156 |
| 4.15 - FIP - Gráficos de eficiência dos serviços TB, SDN e SDA..... | 157 |
| 4.16 - FIP - Gráficos de eficiência do serviço UP..... | 158 |
| 4.17 - PROFIBUS - Gráficos do serviço periódico concorrendo com o serviço aperiódico - $t_p = f(t_{LUP})$ | 160 |
| 4.18 - PROFIBUS - Gráficos do "overhead" de rotação do "token" - $O_{t_{RR}} = f(n)$ | 161 |
| 4.19 - PROFIBUS - Gráficos do serviço periódico em função da rotação do "token" - $t_p = f(t_{t_{RE}}, n)$ | 162 |
| 4.20 - FIP - Gráficos do serviço periódico - $t_p = f(n, t_{t_{RE}},$ $t_{LUP})$ | 165 |
| 4.21 - FIP - Gráficos do tempo de reação do sistema - $t_{ER} =$ $f(t_{LUP}, n_{IDa})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo sem sincronização..... | 168 |
| 4.22 - FIP - Gráficos do tempo de reação do sistema - $t_{ER} = f(t_{LUP}, n_{IDa})$ para $n_p = 30$ e macro- ciclo sincronizado..... | 168 |
| 4.23 - PROFIBUS - Gráficos do tempo de acesso ao barramento $t_{ABH} = f(t_{LUPH})$ e $t_{ABL} = f(t_{LUPL})$ | 172 |
| 4.24 - PROFIBUS - Gráficos do tempo de acesso ao barramento perturbado pela rotação do "token"..... | 173 |
| 4.25 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento - $t_{AB} = f(t_{LUP}, n_{IDa})$ para $n_p = 1$ e macro-ciclo sem sincronização..... | 176 |

- 4.26 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 - $t_{AB} = f(t_{LUP}, n_{IDa})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo sem
 sincronização..... 176
- 4.27 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 - $t_{AB} = f(t_{LUP}, n_{IDa})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo
 sincronizado..... 177
- 4.28 - FIP - Gráficos dos serviços periódico e aperiódico
 concorrentes - $t_{AB} = f(n_p)$ (macro-ciclo sem
 sincronização)..... 177
- 4.29 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 - $t_{ABL} = f(t_{LUPL}, t_{LUPH})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo
 sem sincronização..... 179
- 4.30 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 - $t_{ABL} = f(t_{LUPL}, t_{LUPH})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo
 sincronizado ($t_{CE} = 8$ ms)..... 179
- 4.31 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 - $t_{ABH} = f(t_{LUPH}, t_{LUPL})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo
 sem sincronização..... 180
- 4.32 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 - $t_{ABH} = f(t_{LUPH}, t_{LUPL})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo
 sincronizado ($t_{CE} = 8$ ms)..... 180

GLOSSÁRIO

- ACK - "frame" de reconhecimento do FIP, para transmissão da requisição (RP_MSG_ACK) ou do reconhecimento (RP_ACK) - de um serviço SDA
- ARP - Analisador Simulador de Redes de Petri
- CLP - Controlador Lógico Programável
- CNC - Comando Numérico Computadorizado
- CRC - Cyclic Redundance Checking
- CRDR - Cyclic Request Data with Reply - Leitura periódica remota de informação
- CSRD - Cyclic Send and Request Data with Reply - Intercâmbio periódico de informação
- DAT - "frame" de variável identificada do FIP, para transmissão da identificador (ID_DAT) ou do valor da variável (RP_DAT)
- DLL - Data Link Layer - Camada Enlace
- E% - Eficiência da transferência de informação
- $E_e(x)$ - entidade da camada enlace identificada por "x"
- f - taxa de transmissão
- FCB/FCV - Frame Control Bit/FCB valid (do PROFIBUS)
- FIP - Factory Instrumentation Protocol/Flux Information Processus
- FSK - Frequency Shift Keying - Modulação por variação de frequência
- GAP_list - lista de endereços de estações compreendidos entre TS e NS em uma dada estação mestre do PROFIBUS
- HD - distância de Hamming

- HSA - Highest Station Address - endereço mais alto (no anel lógico do PROFIBUS)
- ID - "frame" identificador do FIP
- IEEE - Institute of Electrical Electronics Engineers
- IEC - International Eletrotechnical Comission
- ISA - Instrument Society of America
- ISO - International Organization for Standartization
- LLC - Logical Link Control - Subnível de controle de enlace lógico da camada enlace
- LMS - List of Master Status - lista do estado das estações no anel lógico do PROFIBUS
- L_sdu - unidade de dados do serviço do usuário da camada enlace
- LSAP - LLC service access point - ponto de acesso ao serviço da camada enlace
- M - serviço de mensagem
- MA - fase de efetiva execução do serviço SDA do FIP na janela de mensagem
- MAC - Medium Access Control - Subnível de controle de acesso ao meio físico
- MAP/TOP - Manufacturing Automation Protocol/Technical and Office Protocol
- MN - fase de efetiva execução do serviço SDN do FIP na janela de mensagem
- MSG - "frame" de mensagem do FIP, para transmissão da requisição (RP_DAT_MSG), do código identificador (ID_MSG) ou do valor (RP_MSG_(ACK ou NOACK))
- n - número de controladores (mestres do PROFIBUS)
- NEMA - National Electrical Manufacturing Association

- nIDa - número de elementos da lista de variáveis aperiódicas de um serviço do FIP
- nM - número de serviços de mensagem a serem executados com (nMA) e sem (nMN) reconhecimento
- n_p - número de transações do serviço periódico
- n_r - número de retransmissões da transação de um serviço
- NRM-HDLC - Normal Response Mode-High Level Data Link Control
- NR/NRH - "frame" resposta "dado não disponível" a um "frame" RDR/SRD do PROFIBUS
- NS - Next Station - estação seguinte (à TS) no anel lógico do PROFIBUS
- nUP - número de serviços aperiódicos a serem executados de alta (nUPH) ou baixa (nUPH) prioridade, determinantes da dimensão das filas de espera da camada enlace
- OSI - Open Systems Interconnection
- Ot_{RR} - "Overhead" de rotação do "token" no anel lógico do PROFIBUS
- PCI - Protocol Control Information
- PDU - Protocol Data Unit
- P_f - perdas finais na interface da camada enlace
- Poll_list - lista de transações por estação mestre do serviço periódico do PROFIBUS
- P_p - perdas físicas introduzidas na camada enlace por imperfeições na camada física
- PROFIBUS - PROcess FIEld BUS
- PS - Past Station - estação anterior (à TS) no anel lógico do PROFIBUS
- Qi - vazão máxima de ocupação da camada enlace

- Qu - capacidade de transmissão da camada enlace
- RDR - Request Data with Reply - Leitura remota de informação
- RDRL/RDRH - "frame" do serviço RDR de baixa (L)/alta (H)
prioridade do PROFIBUS
- RdPTE - Redes de Petri Temporizadas Extendidas
- RdP - Redes de Petri
- RETB - Requisição Explícita de Transferência de "Buffer" -
fase de transferência da lista de variáveis do serviço
aperiódico do FIP
- RF - "frame" de recepção
- RP - "frame" resposta do FIP, para transmissão de
requisições (RP_DAT_RQi; RP_DAT_MSG), e valores
(RP_DAT, RP_MSG, RP_RQi)
- RQi - "frame" do serviço aperiódico do FIP, para
transmissão da requisição (RP_DAT_RQi), do
identificador (ID_RQi) ou da lista de variáveis
aperiódicas (RP_RQi)
- SC - "Single Character" - "frame" de resposta curta do
PROFIBUS
- SDA - Send Data with Acknowledge - Envio de informação com
reconhecimento
- SDAL/SDAH - "frame" do serviço SDA de baixa (L)/alta (H)
prioridade do PROFIBUS
- SDN - Send Data with No acknowledge - Envio de informação sem
reconhecimento
- SDNL/SDNH - "frame" do serviço SDN de baixa (L)/alta (H)
prioridade do PROFIBUS

- SRD - Send and Request Data with Reply - Intercâmbio de informação
- SRDL/SRDH - "frame" do serviço SRD de baixa (L)/alta (H) prioridade do PROFIBUS
- T - ciclo de processo (período característico de interação com um processo sob controle/monitoração)
- t_{AB} - tempo de acesso ao barramento
- t_{ABH} - tempo de acesso ao barramento do serviço aperiódico de alta prioridade
- t_{ABL} - tempo de acesso ao barramento do serviço aperiódico de baixa prioridade
- t_{at} - tempo de ativação do serviço periódico
- t_{ap} - atraso de propagação do sinal no meio físico entre árbitro e produtor do FIP
- TB - serviço transferência de "buffer" do FIP
- t_{CA} - intervalo de tempo indicativo da duração da janela aperiódica
- t_{CA} - atraso de propagação do sinal no meio físico entre árbitro e consumidor do FIP
- t_{CAR} - tempo de transmissão de um caracter de 11 bit no PROFIBUS
- $t_{cc}(t_{ix})$ - tempo entre a ocorrência de duas primitivas "confirm" ("indication") do serviço periódico do PROFIBUS
- t_{CE} - intervalo de tempo de duração de um ciclo elementar
- t_{CM} - intervalo de tempo de duração da janela de mensagem
- t_{CP} - intervalo de tempo de duração da janela periódica

- t_{CB} - intervalo de tempo de duração do ciclo de sincronização
- t_{ET} - tempo entre duas transações consecutivas de um dado serviço
- TF - "frame" de transmissão
- t_{ID} - tempo ocioso na estação iniciadora entre o final de um "frame" (recebido ou emitido) e o início do seguinte (emitido)
- t_{PC} - atraso de propagação do sinal no meio físico entre produtor e consumidor do FIP
- t_{PC} - tempo de processamento da primitiva "confirm"
- t_{PR} - tempo de processamento da primitiva "request"
- t_{PI} - tempo de processamento da primitiva "indication"
- t_P - tempo de execução das n_P transações do serviço periódico
- t_{PRE} - tempo de transmissão do campo de sincronização (PRE) dos "frames" do FIP
- t_{RC} - tempo entre as primitivas "request" e "confirm"
- t_{RF} - comprimento (em bit) do "frame" resposta
- t_{RI} - tempo entre as primitivas "request" e "indication"
- t_{RR} - tempo efetivo de rotação do "token" do PROFIBUS
- t_{RX} - tempo de transmissão do "frame" resposta
- TS - This Station - estação presentemente de posse do "token" no anel lógico do PROFIBUS
- t_S - tempo de execução de um serviço
- t_{SDAR} - tempos de reação da estação árbitro do FIP, a um "frame" recebido

- t_{BDC} - tempo de reação da estação consumidora do FIP, a um "frame" recebido
- t_{BDI} - tempo de reação da estação iniciadora do PROFIBUS à conclusão do serviço precedente
- t_{BDR} - tempo de reação da estação respondedora do PROFIBUS, a um "frame" recebido
- t_{BDP} - tempo de reação da estação produtora do FIP, a um "frame" recebido
- t_{BL} - "time-slot" - "time-out" de espera por um "frame" resposta na estação iniciadora
- t_{BM} - margem de segurança para t_{ID} em relação a t_{BYN} no PROFIBUS
- t_{BP} - tempo total de execução dos serviços precedentemente solicitados e enfileirados nos "buffers" de transmissão
- t_{BR} - tempo de reação do sistema (execução de um determinado ciclo de serviços)/tempo entre execuções sucessivas do serviço periódico
- t_{BYN} - tempo de transmissão do campo de sincronização (SYN) do "frame" iniciador do PROFIBUS
- t_{ID} - atraso de propagação do sinal no meio físico
- t_{IF} - comprimento (em bit) do "frame" iniciador
- t_{TH} - tempo máximo permitido para que uma estação retenha o "token" no PROFIBUS
- t_{TR} - tempo nominal de rotação do "token" do PROFIBUS
- t_{TX} - tempo de transmissão do "frame" iniciador
- t_u - tempo entre duas solicitações consecutivas dos serviços aperiódicos (ou de mensagem)

- to - "time-out" de espera, no árbitro do FIP, por uma reação da entidade remota
- t₁ - "time-out" de espera, no produtor/consumidor do FIP, por uma reação da entidade remota
- t_e - "time-out" de ativação do árbitro de "back-up" no FIP
- UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter - circuito integrado básico da implementação do PROFIBUS
- UCS - Universal Cyclic Service (do PROFIBUS)
- UP - serviço aperiódico
- VLSI - Very Large Scale Integration
- x - número máximo de rotações do "token" até a sua aquisição pela estação TS do PROFIBUS

RESUMO

O presente trabalho situa-se no contexto dos esforços de criação de um padrão para interligação de dispositivos a nível do "field-bus", e objetiva avaliar o desempenho da camada enlace de dados do FIP e do PROFIBUS, duas entre as principais propostas candidatas à padronização internacional.

Partindo-se de uma introdução geral do contexto em que o "field-bus" se insere e focalizando o estudo sobre as suas restrições de carácter temporal, é definido um modelo genérico para a camada enlace e os critérios de análise, que caracterizam a metodologia estabelecida para a avaliação de desempenho.

Esta metodologia é aplicada às propostas, com o intuito de estabelecer modelos em Redes de Petri para os seus serviços. Os modelos são então simulados e é desenvolvida uma análise comparativa sobre os resultados obtidos.

Como principal contribuição, discute-se os resultados obtidos, enfatizando as vantagens e restrições do PROFIBUS e FIP, e gerando uma proposta de alternativas para a camada enlace. Como subproduto é estabelecida uma metodologia de análise de desempenho, aplicável a outras especificações de camada enlace de "field-bus".

ABSTRACT

This work is situated within the efforts to create a standard for interconnection in the field-bus level, and it intends to evaluate the Data Link Layer (DLL) performance of FIP and PROFIBUS, two among the main contender proposals to the field-bus standard.

From a general introduction to the field-bus context, and focalizing the performance study on field-bus' temporal restrictions, it is defined a general DLL model and the criteries that characterize the performance evaluation methodology.

This methodology is applied to the proposals, to establish Petri net models for their DLL services. The models are simulated and a comparative analysis is developed on the results.

As the main contribution, the performance results and the main advantages and restrictions of the proposals are discussed, and data link layer alternatives are generated. As other result, it is established a performance analysis methodology to be applied to other DLL services proposals.

1. INTRODUÇÃO

Dos esforços de criação de padrões internacionais para interligação de computadores e equipamentos de produção, controle e monitoração, nos diversos níveis de automação na área fabril, resultaram notadamente os projetos MAP/TOP [MAP87] em que convergiram os trabalhos do OSI/ISO [DAY83], IEC (Proway) [IEC286], IEEE (Projeto 802). Neste contexto, os protocolos de interligação do tipo "field-bus" têm sido foco de interesse dos atuais esforços de padronização, sendo conduzidos pela IEC, ISA e IEEE, dentre outros, em torno da análise e revisão de um conjunto de sistemas propostos para a padronização internacional (FIP, PROFIBUS, Rosemount, Philips, ERA/MIL-STD-1553B, Foxboro, etc.).

O presente trabalho descreverá o estudo de desempenho, desenvolvido no contexto do "field-bus", em torno das propostas PROFIBUS e FIP.

O Capítulo 2 [AGUI589] apresentará o contexto do estudo, procurando caracterizar o "field-bus", quanto:

- ao seu âmbito de aplicações no ambiente de automação industrial integrada, destacando os parâmetros relacionados com: volume e fluxo de informação, tempo de resposta, dispositivos atendidos, etc.;
- aos requisitos estabelecidos pelos órgãos de normalização internacional, atuantes na área;
- às propostas candidatas ao padrão "field-bus", com uma breve análise comparativa;
- às tendências do processo de padronização em cada camada.

Desta análise geral se delineará o foco do estudo de desempenho a ser desenvolvido, em termos de resultados pretendidos.

No Capítulo 3 será definido o escopo de abrangência da análise de desempenho e a metodologia para o seu desenvolvimento. Com base nesta metodologia serão apresentadas as principais informações levantadas e deduzidas a respeito dos elementos, serviços e tempos da camada enlace do FIP e PROFIBUS, relacionadas com a análise de desempenho.

Com base nestas informações, no Capítulo 4 serão desenvolvidos modelos em Redes de Petri Temporizadas Extendidas, cuja simulação permitirá a análise do desempenho das propostas PROFIBUS e FIP. A análise de desempenho enfocará, particularmente, os aspectos de eficiência temporal, confiabilidade e integridade da camada enlace e tempos de execução de serviços periódicos e aperiódicos, como medidas indiretas da periodicidade e do tempo de acesso ao barramento.

Como conclusão do trabalho, pretende-se obter indicações sobre as vantagens e restrições de cada proposta e alternativas a serem propostas frente as restrições de desempenho observadas. Adicionalmente, é executada uma avaliação da metodologia de análise de desempenho utilizada.

A título de orientação geral, para uma consulta interessada somente nos principais aspectos da análise de desempenho, sem se ocupar das características das propostas, recomenda-se a leitura seletiva dos itens 3.1, 3.2, 3.5, 4.1, 4.2, 4.3 e 4.5. Informações mais detalhadas são apresentadas nos itens 4.4 (resultados de desempenho), nos itens 3.3 e 3.4 (descrição das propostas) e nos Anexo 7.1 (análise temporal dos serviços) e 7.2 (modelos em Redes de Petri dos serviços).

2. CONTEXTO DO ESTUDO

2.1 INTRODUÇÃO

A estrutura funcional dos Sistemas de Produção Industrial segue geralmente uma organização hierárquica em níveis, associados a funções específicas do processo de produção, com requisitos distintos de comunicação, tais como: volume e tamanho da informação e tempo de resposta (fig. 2.1), na integração dos elementos dos diversos níveis.

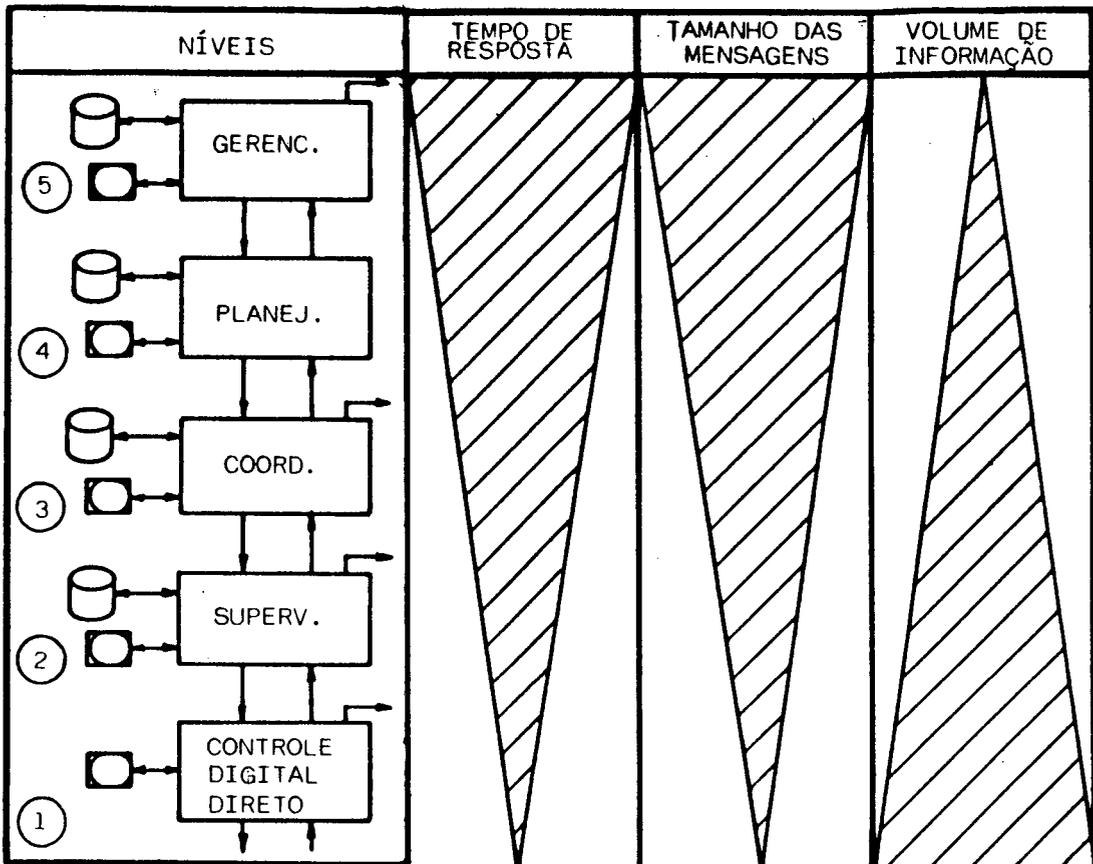


FIGURA 2.1 - Estrutura funcional do sistema de produção industrial - requisitos de comunicação

A associação destes requisitos de comunicação às soluções de redes locais correspondentes é geralmente representada por uma estrutura em 3 níveis, conforme indicada na figura 2.2,

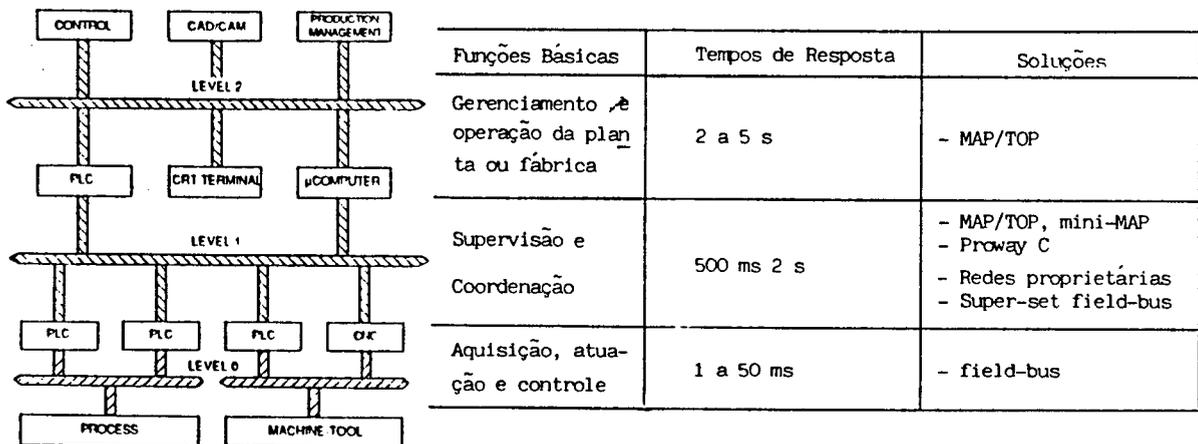


FIGURA 2.2 -- Hierarquia de comunicação fabril

caracterizando o seguinte âmbito de atuação:

- nível 2: redes para interligação de computadores das áreas de engenharia e planejamento com as unidades de supervisão/monitoração de plantas/células, na área de produção;
- nível 1: redes para interligação dos equipamentos controladores (CLP, CNC, controladores em malha fechada, etc.) com as suas unidades de supervisão/monitoração, no âmbito de uma célula ou planta;
- nível 0: redes a nível de campo, "field-bus" (ou barramento de campo), para interligação dos equipamentos controladores com os seus dispositivos de entrada e saída (sensores/atuadores), que interagem diretamente com o processo sob controle/monitoração.

Na figura 2.3 é apresentado um exemplo de um sistema hierarquizado de redes locais de comunicação, com a utilização de "field-bus", respeitando este âmbito de atuação.

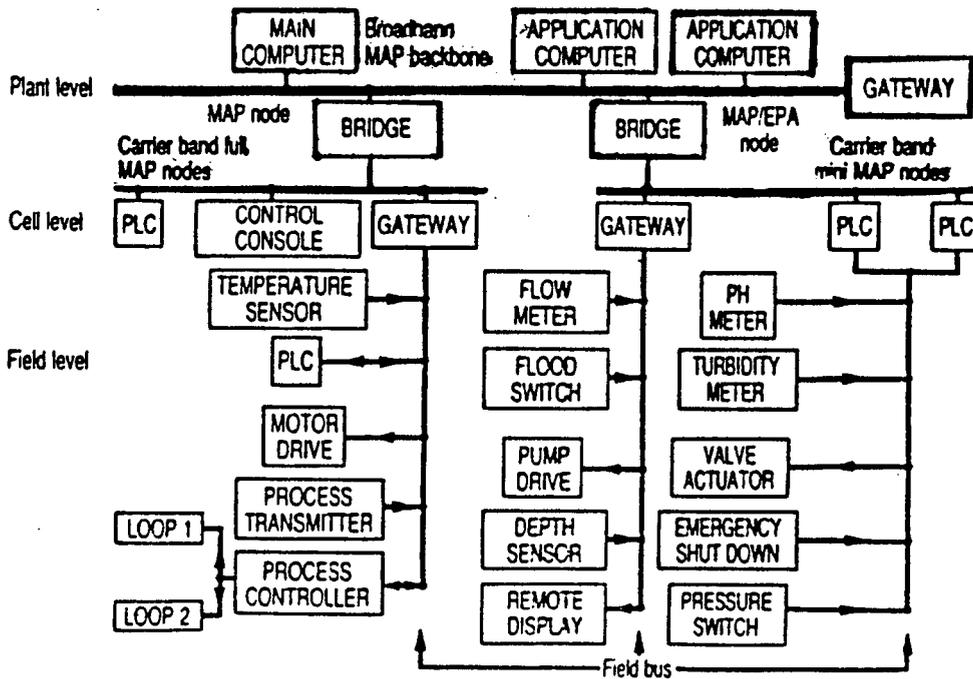


FIGURA 2.3 -- Exemplo de aplicação do "field-bus" [IEC306]

Pretende-se neste Capítulo detalhar alguns dos requisitos de comunicação e descrever os esforços de padronização no nível 0, o "field-bus". Serão descritos o seu escopo de aplicações e parâmetros de caracterização, implicações, requisitos dos órgãos avaliadores e propostas candidatas à padronização, com o intuito de se delinear o foco de interesse dos trabalhos de análise de desempenho a serem desenvolvidos.

2.2 CARACTERIZAÇÃO

2.2.1 Definição

Na definição da ISA ("Instrument Society of America") [ISA187], o "field-bus" é uma linha de comunicação serial, digital, bidirecional (de acesso compartilhado), para interligação dos dispositivos primários de automação (transmissores/sensores, atuadores/elementos de controle final e outros pequenos dispositivos inteligentes, com capacidade de processamento local), instalados na área de campo e os dispositivos de controle/automação de nível imediatamente superior (controladores), instalados na "sala de controle". A definição da IEEE ("Institute of Electrical Electronics Engineers") [IEEE87], apresenta-o como um barramento para interligação generalizada de pequenos dispositivos, usados em instrumentação, controle de processos e automação da manufatura, controle de edifícios, etc.

O "field-bus" visa, desta forma, a substituição das ligações tradicionais, ponto-a-ponto, e dos módulos de entrada e saída (E/S) dos controladores (controladores programáveis - CLP, controladores dedicados, etc.), na interligação destes controladores com os dispositivos de campo (figura 2.4).

2.2.2 Histórico

A primeira idéia de "field-bus" emergiu nas áreas nuclear e militar (CAMAC/MIL-STD-1553B) [DEC087]. O interesse primeiro em aplicações industriais consistiu na substituição das

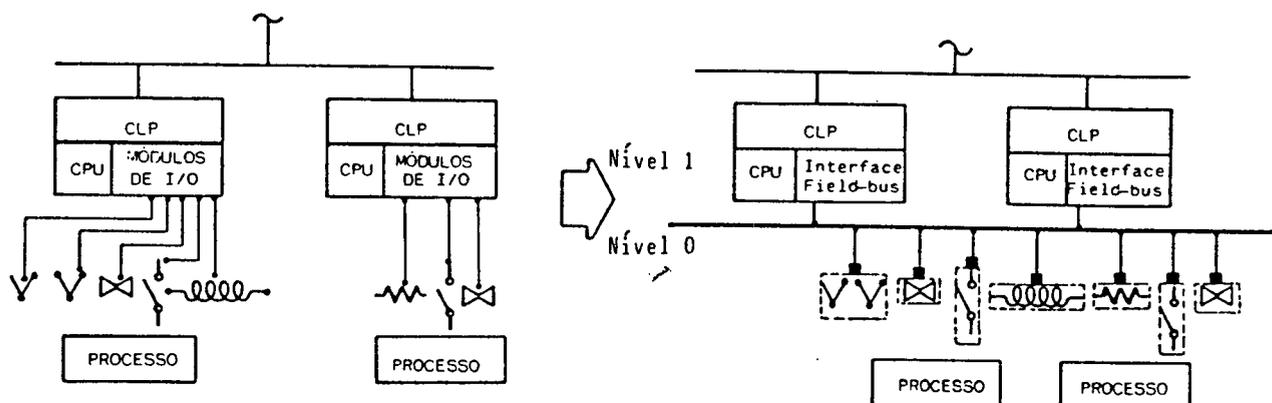


FIGURA 2.4 - Função do "field-bus"

ligações analógicas (4-20 mA) e digitais (0-24 V), impulsionada pela incorporação de capacidade de processamento em pequenos dispositivos a baixo custo.

Diante deste contexto, e pela importância de se inserir interoperabilidade e intercambiabilidade entre implementações de "field-bus" em dispositivos de diferentes fabricantes, através de uma iniciativa da IEC ("International Electrotechnical Commission"), definiu-se os requisitos gerais a serem atendidos pelo padrão "field-bus" [IEC386]. Diversos grupos de trabalho foram criados em torno desta problemática, tendo se ocupado de definir e revisar os requisitos do "field-bus" e analisar possíveis soluções, propostas por fabricantes ou órgãos de normalização, para a padronização internacional.

Atualmente, os principais grupos que estão contribuindo ativamente para os trabalhos de padronização, como avaliadores ou proponentes, são os seguintes:

- a. Avaliadores: IEC TC65/SC65/WG6 (internacional), ISA SP50 (norte americano), EUREKA Field-bus (projeto europeu),

NEMA ("National Electrical Manufacturing Association" - norte americano), que especificaram requisitos gerais e funcionais para o "field-bus" [IEC386] [ISA187] [EURE87] [NEMA288] e estão promovendo avaliações sobre propostas candidatas à padronização;

- b. Proponentes: PROFIBUS, FIP, ERA, Foxboro, Rosemount, Philips, que geraram especificações abrangentes de sistemas candidatos à padronização [SIEM88] [THOM187] [BURT88] [FOX88] [ZIEL87] [SCHU87].

Adicionalmente, o grupo do P1118 da IEEE [IEEE87] está trabalhando sobre um barramento de propósito geral para microcontroladores, baseado no Bitbus [AMRH88], que possui algumas características convergentes com o "field-bus".

Algumas definições e tendências têm emergido dos trabalhos dos diversos órgãos avaliadores sendo que, atualmente, o principal forum de discussão em torno da definição do padrão "field-bus" é a ISA, pelo peso mercadológico que representa.

2.2.3 Características

Os três principais aspectos considerados na caracterização do "field-bus" foram: os requisitos físicos e temporais das suas aplicações básicas, os dispositivos que interliga e as características do seu fluxo de informação.

2.2.3.1 Requisitos das aplicações

O "divisor d'aguas" clássico das aplicações em automação industrial é a classificação das mesmas em aplicações de Controle de Processos e Automação da Manufatura, tendo como fatores básicos de diferenciação os seus requisitos de tempo (em termos de ordem de grandeza, constância e periodicidade).

Os requisitos gerais típicos, impostos ao "field-bus" por 80 % das aplicações em Controle de Processos (controle amostrado de variáveis de um processo contínuo, supervisão de pequenos controladores, etc.) e Automação da Manufatura (controle "batch", comando e acionamento de máquinas e motores, fins de curso, alarmes, etc.) são apresentados na tabela da figura 2.5 [WOOD208].

| Característica | tempo | dispersão geográfica | alimentação via barra | controlador e multiplexador no campo |
|-------------------------|---------------|---|-----------------------|--------------------------------------|
| Controle de Processos | 100 ms a 10 s | 50 a 1500 m (planta) | sim | não |
| Automação da Manufatura | 5 a 500 ms | 5 a 25 m (máquina) 20 a 200 m (célula) | não | sim |

FIGURA 2.5 -- Tabela de requisitos Automação da Manufatura/
Controle de Processos

Entretanto, pode haver também a coexistência de aplicações em Controle de Processos e Automação da Manufatura, bem como existir outros tipos de aplicações (automação dos transportes, edifícios, etc.) com requisitos similares.

Em consequência, a definição do padrão deve considerar a necessidade de uma solução única de "field-bus", válida tanto para Controle de Processos como Automação da Manufatura, e com possibilidade de adoção em outras áreas de aplicação.

2.2.3.2 Dispositivos interligados

A tabela da figura 2.6 apresenta algumas das características médias dos dispositivos de campo, geralmente atendidos [DECO87] pelo "field-bus" (dispositivos primários de automação). Nesta tabela é importante observar que os

| Característica | No. bits | Tempo de resposta | Preço (médio) | Exemplos de dispositivos |
|--------------------------------|----------|-------------------|---------------|---------------------------------|
| Dispositivo analógico rápido | 12 | 1 ms | \$50 | corrente, tensão, velocidade |
| Dispositivo analógico lento | 12 | 1 s | \$50 | temperatura, vazão |
| Entradas digitais tipo eventos | 1 | 1 ms | \$1-5 | fim de curso, trigger |
| Entradas digitais tipo estado | 1 | 20 - 100 ms | \$1-5 | interfaces BCD, identificadores |
| Atuadores ON/OFF | 1 | 20 ms - 1 s | variável | válvulas, relés |
| Contadores/Totalizadores | 16 | 1 ms | \$200 | 'timers'/régua óptica |

FIGURA 2.6 - Tabela de características gerais de dispositivos [DECO87]

dispositivos são de baixo custo, geram informações de pequeno tamanho, a uma elevada taxa (baixo tempo de resposta), implicando num alto volume de informação, sendo que, em comparação com os níveis 1 e 2, o comportamento é conforme indicado na figura 2.1.

2.2.3.3 Fluxo de informação

Adotou-se para o fluxo de informações a nível do "field-bus", uma classificação segundo 3 categorias:

- periódico: relacionado com a medição e atualização periódica de controles ou com outras funções a nível de sistema ("time-stamp");
- aperiódico: relacionado com o intercâmbio não determinístico (eventual) de variáveis, útil na garantia de consistência de cópias de variáveis periódicas ou em funções de alarme, "set-up" de valores, medições e atualizações assíncronas e na sincronização de eventos;
- mensagens: relacionadas com as informações complementares relativas ao processo, ao dispositivo ou ao "field-bus", tais como: "dados de placa" do fabricante, versão de implementação do "field-bus", mensagens para o operador.

Os dados associados aos fluxos periódico e aperiódico são de tamanho limitado (em torno de 8 bytes), enquanto as mensagens apresentam tamanho maior (em torno de 256 bytes).

No nível 0, os fluxos periódico e aperiódico são sensivelmente mais expressivos que nos níveis 1 e 2, podendo ocupar quase a totalidade da banda útil do "field-bus". Em contra-partida, o fluxo de mensagem é bastante menos expressivo. A medida que se sobe na hierarquia de comunicação (níveis 1 e 2), o processo se inverte.

2.3 IMPLICAÇÕES DO "FIELD-BUS"

As principais vantagens e benefícios da utilização do "field-bus", em relação às conexões convencionais, são a nível:

a. Económico, devido a redução:

- de cablagem, na utilização de um meio físico compartilhado;
- dos canais de comunicação com o processo, permitindo que todo o sistema de E/S do controlador seja feito através da interface "field-bus" (fig. 2.4);
- do tempo e complexidade do projeto de uma instalação, na ótica de leiaute, proteção contra ruído e interferência, terminações, etc.

b. Técnico-operacional, devido a maior:

- facilidade de instalação e manutenção, pela manipulação de um menor número de cabos e conexões;
- facilidade de deteção, localização e identificação de falhas, através de funções de monitoração automática;

- modularidade no projeto e instalação, aumentando a flexibilidade de expansão de funções.

c. Sistêmico, devido:

- ao aumento da consistência e da confiabilidade da informação, através da sua digitalização e pré-processamento e da capacidade de correção de erros de transmissão;
- à possibilidade de sincronização dos instantes de amostragem de E/S, melhorando o controle de processos amostrados;
- à melhoria do desempenho global da aplicação, através da utilização paralela de diversos elementos com capacidade de processamento;
- à otimização da utilização de controle "batch" com controle realimentado e vice-versa, através do intertravamento de funções e da integração dos seus componentes via "field-bus";
- à compatibilidade entre as comunicações do nível 0 com os níveis 1 e 2.

d. Mercadológico, pela possibilidade de:

- redução dos custos de sistemas, através da aquisição seletiva de dispositivos compatíveis de múltiplos fornecedores;
- desacoplamento do "software" de supervisão da dependência de um fornecedor específico, normalmente o fabricante do "hardware".

As desvantagens de caráter sistêmico na utilização do "field-bus" residem nas restrições de tempo e confiabilidade, resultantes da utilização de um meio físico compartilhado para os fluxos de informação de diversos dispositivos independentes.

Entretanto, a confiabilidade e disponibilidade do barramento podem ser melhoradas, através da introdução de redundâncias de meio físico e estações.

As restrições de tempo envolvem a conjugação de fatores, tais como:

- os requisitos de tempo do processo;
- os tempos de resposta dos dispositivos interligados;
- algumas das características internas do "field-bus", tais como: o mecanismo de acesso ao meio físico (centralizado ou distribuído); a capacidade de suportar configurações multi-controlador; a taxa de transmissão; a facilidade de configuração; os tempos de reação e outros tempos internos dependentes da implementação.

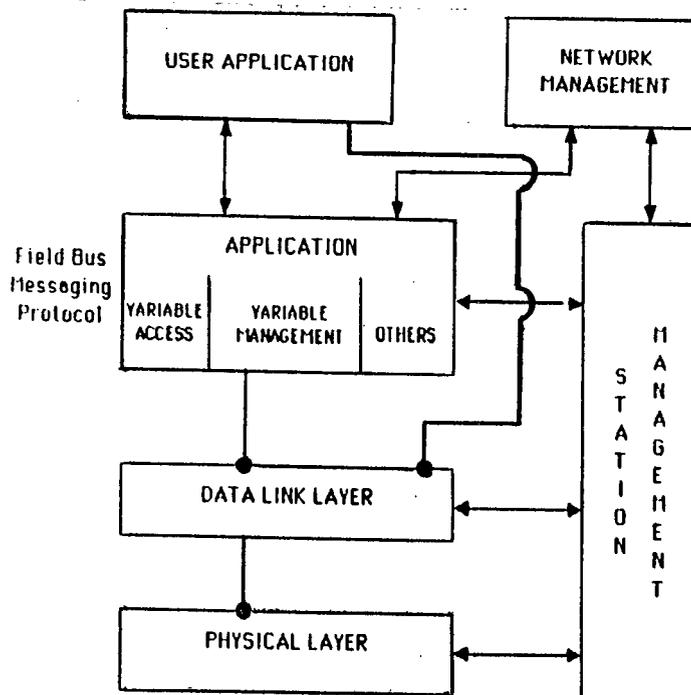
2.4 CONTEXTO DOS TRABALHOS DE PADRONIZAÇÃO

As indicações apresentadas neste item estão referenciadas aos documentos de especificação de cada avaliador e/ou proponente, refletindo a visão dos mesmos na época em que foram gerados.

2.4.1 Requisitos para avaliação das propostas

Os principais requisitos funcionais, que norteiam os trabalhos de avaliação são:

- minimização de custos por conexão e aproveitamento do investimento em cablagem instalada;
- simplicidade de implementação;
- otimização do balanço entre alcance, taxa de transmissão, número de dispositivo, bitola de cabo, alimentação via barramento, segurança intrínseca, custos, etc.
- adoção do modelo OSI/ISO reduzido a 3 camadas (fig. 2.7): camada aplicação, camada enlace, camada física, gestão de rede e gestão de estação;
- compatibilidade com MAP.



● = Service Access Point

↔ = Function Access Point

FIGURA 2.7 - Modelo de referência [ISA187]

Na tabela da figura 2.8 são sintetizadas as principais indicações de requisitos e recomendações da IEC, ISA, IEEE, NEMA e EUREKA.

Em linhas gerais, estes requisitos são convergentes, apresentando algumas diferenças, em termos de: categorias de "field-bus", alcances, número de elementos, previsão ou não de alimentação via barramento, segurança intrínseca, topologia e elementos físicos associados (repetidores, caixas de junção, etc.).

Adicionalmente, os requisitos refletem também a ênfase dada por cada comissão. A IEC [IEC386] definiu requisitos gerais para caracterizar o escopo dos trabalhos. A ISA [ISA187] e a NEMA [NEMA288] apresentam conjuntos de requisitos, refletindo os interesses dos usuários específicos: instrumentação/controle de processos e automação da manufatura, respectivamente. Contudo, a NEMA vem desenvolvendo um trabalho conjunto com a ISA, tendo adotado muitos dos seus requisitos. O IEEE [IEEE87], com objetivos ligeiramente diferentes dos demais, define mais as características gerais de uma rede de microcontroladores.

Os requisitos ISA, pela sua abrangência e detalhamento, vem sendo adotados como referência para caracterização das propostas, e os requisitos de desempenho mais restritivos são dados pela NEMA e EUREKA. Em termos de valores de requisitos de desempenho, tem-se:

- ISA: - H1: 10 msg(32 bit)/s, equivalente a 320
bit(L_sdu)/s;

| Característica | IEC | ISA | NEPA | IEEE | EUREKA |
|------------------------------|---|---|--|---|--|
| a. Casada Física | | | | | |
| Alcance máximo (m) | 40 ; 350 ; 1500 desejável | 1900 (HL) ; 750 (HE) | 750 (tronco) | 2000 ; 5000 | 1500 sem repetidor |
| Taxa de transmissão (kbps) | ; | ; | 1000 | 50 e 500 | 19,2 a 1000 |
| Topologias | ! barramento com "stubs" (10 m) ; ! "hoze run" ; ! ; ! ; | ! tronco com "stubs" (20 m) ; ! ; ! ; | ! múltiplos segmentos interligados! barra simples/back-plane, estre- ! ; ! ; | ! múltiplos segmentos interligados! ! ; ! ; | ! barra simples/back-plane, estre- ! ; ! ; |
| Número máximo de conexões | 30 ; 30 ; escopo reduzido ;) 5 | 32 ;) 32 | 32 | 63=16/segmento ; 255=32/segmento! | 30 sem repetidor |
| Meio Físico : tipo | ! par trançado, cabocoaxial/twin- ! axial, fibra óptica, rádio | ! par trançado | ! par trançado | ! par trançado ! (conector específico) | ! par trançado, cabo coaxial, fi- ! bra óptica e rádio (capacidade ! de múltiplos meios) simultâneos |
| ! alternativo | ! — | ! cabo premium, fibra óptica, rádio! | ! nd | ! a especificar | ! |
| ! especificação | ! nd | !)=20 AHS | ! nd | ! nd | ! nd |
| ! blindagem | ! nd | ! coletiva e com outros sinais | ! sim, individual | ! nd | ! nd |
| Isolação galvânica | ! 500 V | ! 250V, Opcional | ! nd | ! 250 V e 250 ohm | ! sim (a definir) |
| Alimentação : via barramento | ! Opcional, c/ sinal e separado | ! Opcional, circuito do sinal | ! previsão futura | ! Opcional, circuito do sinal | ! 36 V, circuito separado |
| ! via caixa de junção | ! — | ! Opcional | ! nd | ! — | ! sim (dependente da topologia) |
| Segurança intrínseca | ! Opcional, escopo reduzido | ! Opcional e inclui contra incên- ! dio | ! nd | ! Opcional | ! Opcional |
| Repetidores | ! nd | ! nd | ! nd | ! a cada 300 m (até 4) | ! sim, com opção de 2x(1/2)Repeti- ! dor com linha dedicada |

FIGURA 2.8 - Tabela de requisitos funcionais do "Field-bus"

| Característica | IEC | ISA | MEMA | IEEE | EUREKA | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--|----------------------|
| Codificação dos dados | nd | nd | nd | self clocked NRZ (*) | Manchester II | |
| b. Casada Enlace | | | | | | |
| Serviços | nd | nd | SMA, SIM E SRD | SMA, SIM, RDR, serv. or. con. | SMA, SIM, RDR, SRD, periódico | |
| Controle de acesso | estrem-escravo ou multi-estrem | par-a-par (sea ação do mestre) | nd | estrem-escravo coo estrem-back- | a ser definido (comunicação par-a-par) | |
| Capacidade de difusão | sim (a priori) para sincronização | sim | sim | "broadcast" e "multicast" | "broadcast" e "multicast" | |
| Integridade | alta | (1 erro/20 anos) → | HD=4 | HD=4 | ((1 erro / 20 anos) →) HD=4 | |
| Disp. de controle por segmento (max) | nd | > 1 (desejável) | > 1 | > 1 | sim | |
| Capacidade de endereçamento físico | 30 | > 32 | 256 | 256 | 63, 255 (desejável) | |
| Capacidade de endereçamento lógico | 60 | > 256 | 256 | 256 | 256 | |
| Tamanho do frame (byte) | nd | 4 e 8 (tamanhos típicos) | 8 (L_sdu) | 255 (1 frase, sea conexão) | 4 até (a ser definido) | |
| Endereço de segmento | nd | nd | não | não | nd | |
| Desseque- nho | > 5000 msg/s | 150 a 110msg/s | escopo redur- zido | 10 msg (32 bit/s) | 1600 msg (64 bit/s) | 400 msg (64 bit)/s |
| tempo de resposta (ms) | 5 | 20 | escopo redur- zido | 100(+) | 1 (entre transa- ções) (*) | 1 (desejável), 10/50 |
| resolução de tempo (ms) | 5 (+) | 20 (+) | 1 | 0,1 | 0,1s (na estação), (0,1s (no pro- cesso)), (0,1ms (no controlador)) | |
| c. Casada aplicação | | | | | | |

FIGURA 2.8 - Tabela de requisitos funcionais do "Field-bus" (Continuação)

| Característica | IEC | ISA | NEWA | IEEE | ENREVA |
|----------------------|--|---|------|--|---|
| - Tipos de mensagens | ! dados de aplicação, dispositivo e manutenção | ! binário: grupo de 16b bit, 14bit; de resolução, BCD, 32 bit; dados; alfanuméricos; P. flut.; relógio! | nd | ! valores binários(estados ON/OFF); alfanumérico (ASCII), ponto flutuante (formato IEEE inteiro) | |
| - Serviços | ! nd | ! - download programas em dispositivos | nd | ! - transferência de dados (usando do SDA, SDW, RDR, e serviços a conexão. | ! - data e hora |
| | | ! - download programas em dispositivos | | ! - controle de tarefas | ! - medições |
| | | | | ! - crita de variáveis | ! - comandos de aplicação |
| | | | | ! - varredura por exceção | ! - leitura, escrita, leitura/escrita de variáveis |
| | | | | ! - stop/start de aplicações | ! - stop/start de aplicações |
| d. Gestão de rede | | | | | |
| - Redundância | ! a ser definida | ! desejável | nd | ! suportada | ! Opcional (topologia) |
| - Funções | ! - monitoração de dados e estado do dispositivo | ! - configuração remota | nd | ! - gerenciamento estado dos dispositivos | ! - configuração remota (dados e programas) de dispositivo |
| | ! - dados de "placa" | ! - monitoração de estado do dispositivo | | ! - acesso a dispositivos por "tag" | ! - monitoração de falhas e eventos (processo e dispositivos) |
| | | ! - "Red-tag" | | ! - "name" | ! - comandos de testes remotos |
| | | ! - acesso a dispositivos por "tag" | | ! - dados de versão | ! - "Red-tag" |
| | | ! - "name" | | ! - dados de "placa" | ! - "tag-name" |
| | | ! - dados de "placa" | | ! - dados de "placa" | ! - dados de "placa" |
| | | | | ! - dados de versão | ! - dados de versão |

nd- não definido

(*)- adequação e correspondência incerta

FIGURA 2.8 - Tabela de requisitos funcionais do "Field-bus" (Continuação)

- H2: 1600 msg(64 bit)/s, equivalente a 102,4 kbit(L_sdu)/s;
- NEMA: 32 msg(64 bit)/8 ms, equivalente a 4000 msg(64 bit)/s e 256 kbit(L_sdu)/s;
- EUREKA:-- Energia: 500 bytes 100 vezes/s, equivalente a 400 kbit(L_sdu)/s;
- Manufatura: 125 bytes 100 vezes/s, equivalente a 100 kbit(L_sdu)/s;
- Controle de Processos: 100 bytes 10 vezes/s, equivalente a 8 kbit(L_sdu)/s.

2.4.2 Propostas candidatas à padronização e tendências

A luz dos requisitos do item 2.4.1, as principais características das propostas abrangentes de sistemas candidatos à padronização, atualmente em discussão nas comissões avaliadoras, são apresentadas na figura 2.9. Deste conjunto de opções, cabe destacar como tendências do processo de padronização:

a. Arquitetura:

A adoção do modelo de referência OSI/ISO reduzido a 3 camadas (fig. 2.7).

| Característica | Digital Hart | Profi-bus | FIP | ERA/MIL-STD-1553B | FOXBORO | PHILIPS |
|---------------------------------|---|---|---|---|---------------------------------|---------------------|
| a. Casada Física | H1 ; H2 ; | H1 ; H2 ; | H1 ; H2 ; | H1 ; H2 ; | H1 ; H2 ; | H1 ; H2 ; |
| - Padrão de referência | ! 1908802/4-10,11;!1908802/4-12,13;! 1908802/4-10,11;! RS485, RS422 ; | ! não possui ; | ! não possui ; | ! MIL-STD-1553B ; | ! RS485, RS422 ; | ! 1908802/4-10,11 ; |
| - Topologia | ! barra linear, ! barra linear, ! estrela "hoce" ; tronco coa ! tronco coa ! tronco coa ; | ! estrela ativa ! estrela ativa ! run" ; | ! rivoa en es-! run" ; | ! "stubs" curtos! rivações ; | ! derivações ; | ! "stubs" longos ; |
| - Número máximo de nós | ! 32 (barra) ; 16 ; 92(linear), ! 10 ; | ! 8 stubs/seg. ; 5 ; | ! 31 ; | ! 4(coa IS e ; 48 ; | ! ; | ! ; |
| - Meio físico | ! par trançado blindado 20 A&S ; | ! 1 a 3 par. tran! par trançado blindado 20 A&S ; | ! par trançado 20 A&S c/blindagem! par trançado ; | ! par trançado 20 A&S c/blindagem! par trançado ; | ! par tran. cabo ; | ! ; |
| - Alcance máximo-tronco(m) | ! 3 ; 1,5 ; | ! =(15 dep. f) ; =(7,2 dep. f) ; | ! 2 ; | ! 12(0,5)/segento! 1,9 ; | ! 0,3(4,1S), 1,8! 0,75 ; | ! ; |
| - Alcance máximo-traco (m) | ! 30 ; 3 ; | ! 100(estrela-6) ; =(2dep. de f) ; | ! 200 ; | ! 13 (tap), 50(rp) ; | ! 0 (tap) ; | ! 3(tap),50(rp) ; |
| - Alimentação via barra | ! sim ; sim ; | ! 3,6 W ; | ! 120- (4/6 fios) 0,5 W; 0,1A/stub(ac(tr) de stubs; 30 mA/elecento! não ; | ! não ; | ! 7 W ; | ! não ; |
| - Acolpamento ao eixo | ! transformador ; transformador ; transformador ; | ! direto c/ ; po- ; transformador ; | ! transformador ; transformador ; transformador ; | ! transformador ; transformador ; transformador ; | ! direto c/po- ; direto s/po- ; | ! transformador ; |
| - Isolação galvânica | ! 250 Vac-rms ; 250 Vac-rms ; | ! 500 Vac-rms ; 500 Vac-rms ; | ! 250 Vac-rms (1S no stubs) ; 250 Vac-rms ; | ! 250 Vac-rms ; 250 Vac-rms ; | ! 500 V ; | ! 500 Vac-rms ; |
| - Codificação do sinal | ! 1908802/4-10.7.2 ; 1908802/4 ; | ! Manchester II ; | ! Manchester II ; | ! Manchester II ; | ! NRZI ; | ! 1908802/4-12.7 ; |
| - Taxas de transmissão-f (kbps) | ! 19,2 ; 500 e 200 ; | ! 9,6; 19,2 ; 500; 187,5; 90 ; | ! 1000 ; | ! 62,5 ; 1000;500;250;125 ; | ! 19,2 ; 248; 76,8; 19,2! ; | ! ; |
| - Terminações exigidas | ! 2(barra), todas (estrela) ; | ! 2 ; | ! 2 ; | ! 2 ; | ! 0 ; | ! ; |

FIGURA 2.9 - Tabela cooperativa das candidatas a "Field-bus"

| Característica | Digital Hart | Profib-bus | FIP | ERA/MIL-STD-1553B | FOXBORO | PHILIPS |
|------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|---|---------------|
| - Redundância | ! nenhuma ! escuta todos ! transaite em todos e "escuta" ! e transaite !; us | ! 2 ! 3 | ! 3 (tr.) 1 (st)! | ! nd | ! nenhuma ! no MAC | ! ; ! ; |
| - Repetidores em série(max) | ! ; | ! ; | ! 3 ! 3 (tr.) 1 (st)! | ! nd | ! ; | ! ; |
| - Características especiais | ! IS pode limitar a IS limita a 10; incremento do alcance-! ! 10 nós alisanta- nós alim. (es-! alcance: Tmmax (2x)! ! dos (estrela) (trela); !(2x) e NS11 (4x); ! | ! ; | ! ; | ! ; | ! auto seleção da! ! taxa de trans-! ! nissão | ! ; ! ; |
| ! b. Casada enlace | | | | | | |
| ! b.1. MAC | | | | | | |
| - Padrão de referência | ! ISO8802/4 | ! IEC 1157, ISO1177, 2022 | ! no possui | ! MIL-STD-1553B | ! ISO3309 (HDL) | ! ISO8802/4 |
| - Implementação | ! single chip | ! microcontr. (baixa velocidade)! | ! ; | ! single chip | ! microcontrolador | ! single chip |
| - Frame "n" bytes MSOM(bit) | !)= % + 8n | ! 66 + 11n | ! 43 + 16(n+1)2 | ! 20 + 20(n+1)2 | ! 48, 4375 + (65/64)n | !)= % + 8n |
| - MSOM máximo (byte) | !)= % | ! 33 | ! 59 | ! 20 | ! 48, 4375 | !)= 9640 |
| - Multicastre | ! sim | ! sim | ! não | ! no | ! não | ! sim |
| - Comunicação par-a-par | ! sim | ! sim | ! sim | ! sim | ! não | ! sim |
| - MSOM máximo (byte) | ! =(8k - 10 | ! 29 | ! 128 | ! 65 | ! 47 | ! =(8k - 10 |
| - Número máximo de estações! | ! 2EXP15 | ! 126 | ! limitação de nível/físico | ! 31 | ! 250 | ! 2EXP15 |
| - Endereçamento multicast | ! 2EXP15 | ! 1 (Broadcast) | ! 2EXP16 | ! 1 (Broadcast) | ! 1 (Broadcast) | ! 2EXP15 |
| - Níveis de prioridade | ! 4 | ! 2 | ! 2 | ! 1 | ! 1 | ! 4 |
| - Distância de "Hopping" | ! 4 | ! 2 e 4 (selecionável) | ! 4 | ! 2 | ! 4 | ! 4 |

FIGURA 2.9 - Tabela comparativa das candidatas a "Field-bus" (Continuação)

| | | | | | | |
|----------------------------------|--|---|--|----------------------|---------------------|--------------------------|
| Característica | Digital Hart | Profi-bus | FIP | ERA/MIL-STD-1553B | FOXBORO | PHILIPS |
| - Taxa de erros não deletados | 2,3EXP-10 | 1,2EXP-4 | 1,5EXP-5 | (0,5 | 1,5EXP-5 | 2,3EXP-10 |
| - Controle redundância do meio | seleção na camada física | seleção na camada física | seleção na camada física | pele mestre | pele mestre | seleção na camada física |
| b.2. LLC | | | | | | |
| - Padrão de referência | ISO8802/2 | ISO8802/2, ISA ds 72.01 | não possui | MIL-STD-1553B | ROL (ISO4335, 7809) | |
| - Número máximo de LSP's | 64 + 2 | 63 | LSAP=MSAP | 32 | 1 | |
| - LSPU máximo (byte) | =(8k - 13 | 28 | LSU=HSU | 64 | 45 | |
| - Serviços | SIM, SDA, RDR | SIM, SDA, RDR, SRO, CSRD, CYC, SDA | SIM, SRO, SDA | SDA, RDR e par-a-par | SIM, SDA, SDACh+ACK | |
| - Suporte para IS0847 (internet) | sim | não | não | não | não | sim |
| c. Canaada Aplicação | | | | | | |
| - Padrão de referência | ISO7506, 8024, 8825 | | | | | |
| - Serviços básicos | read, write, define. Variable, delete Variable, getVarAttributes | read, write, receive, send, getObjectDesc | read, write, receive, Spatial & Temporal data set synchronization! | | | |
| - Características especiais | sintaxe de transferência mais eficiente que ASN.1 | | dicionário de obj. inclui freq. de varredura e regras de sincron. | | | |

FIGURA 2.9 - Tabela comparativa das candidatas a "Field-bus" (Continuação)

| Característica | Digital Hart | Profi-bus | FIP | ERA/MIL-STD-1553B | FOXORO | PHILIPS |
|---|--------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|------------|
| Id. Dados Complementares | | | | | | |
| - Desempenho (msg/s) | 65 | 40 a 498 | 369 | 558 | 66 | 625 |
| - Taxa do usuário fLLC (kbit (LSU)/s) | 97,56 | 1,28 a 15,92 | 11,81 | 17,85 | 2,11 | 40 |
| - Taxa de transmissão-PPM (kbit(PPM)/s) | 19,2 | 9,6 a 90 | 50 | 62,5 | 19,2 | 268 |
| - Eficiência (%) (fLLC/PPM) x 100 | 10,8 | 13 a 17,7 | 23,6 | 28,6 | 11,0 | 14,9 |
| - Instituição proponente | Rosecount | Siemens A.6 | Club FIP | ERA Technology | Foxboro/Future Concepts | Philips |
| - Fabricante | fabricante | nacional (alemão) | nacional (francês) | nacional (britânico) | fabricante | fabricante |

nd - não definido

FIGURA 2.9 - Tabela comparativa das candidatas a "Field-bus" (Continuação)

b. Camada aplicação:

Há uma tendência de se basear a camada aplicação no MMS (RS-511), a nível dos serviços de mensagem, e PMS (ISA 72.02), com simplificações. A nível dos serviços periódicos e aperiódicos de manipulação de variáveis, existe a possibilidade de se adotar outras implementações mais otimizadas, a exemplo do FIP [NEMA188].

c. Camada enlace:

A camada enlace é subdividida em duas subcamadas, LLC ("Logical Link Control") e MAC ("Medium Access Control"). As definições em cada subcamada são as seguintes:

c.1 LLC:

Na subcamada LLC, três serviços básicos são adotados:

- SDA (envio de informação com confirmação de recebimento);
- RDR (leitura remota de informação);
- SDN (envio de informação sem reconhecimento).

Um quarto serviço (SRD - intercâmbio de informação) está também em discussão [IEC488]. A Foxboro propõe ainda a inclusão de serviços com conexão (NRM-HDLC) [FOX8388].

Esses serviços permitem implementar os fluxos periódico, aperiódico e de mensagem. No caso do fluxo periódico, as funções de controle de varredura das variáveis periódicas podem fazer parte ou não dos serviços da camada enlace. Nas propostas da Philips, Foxboro e Rosemount, distintamente do FIP, PROFIBUS, e ERA/MIL-STD-1553B, estas funções não integram a camada enlace.

Adicionalmente, o controle de varredura das variáveis periódicas pode alcançar a definição dos instantes e intervalos de tempo específicos para execução de cada tipo de fluxo de informação, a exemplo do FIP e do MIL-STD-1553B, ou restringir-se à contínua varredura de uma lista de variáveis, a exemplo do PROFIBUS.

c.2 MAC:

Na sub-camada MAC encontram-se as mais fortes divergências, em relação à adoção de uma solução centralizada ou distribuída.

O MAC centralizado (FIP, ERA, FOXBORO) facilita o controle de varredura do serviço periódico, sendo mais apropriado para configurações onde há um único controlador (elemento centralizador do controle do fluxo de informação), o que corresponde à maioria das aplicações convencionais. Contudo, mostra-se problemático do ponto de vista de confiabilidade e em arquiteturas multi-controlador (com exceção do FIP em que o controle de fluxo é independente do número de controladores).

O MAC distribuído, baseado no "token-passing" (PROFIBUS, Digital Hart e Philips), mostra-se mais disponível, por não possuir elementos centrais dos quais dependa a operação do barramento. Permite configurações multi-controladores, onde cada controlador gerencia o seu próprio fluxo de informação, atendendo a configurações complexas. Contudo, o MAC distribuído apresenta restrições sensíveis ao adequado controle da periodicidade das transações que cada controlador executa (normalmente associadas ao serviço periódico), em suas interações com o processo sob controle, pois dificulta a sincronização dos períodos de interação - fig. 2.10 ("control sampler", "sensor sampler") com o período de chaveamento do "network sampler".

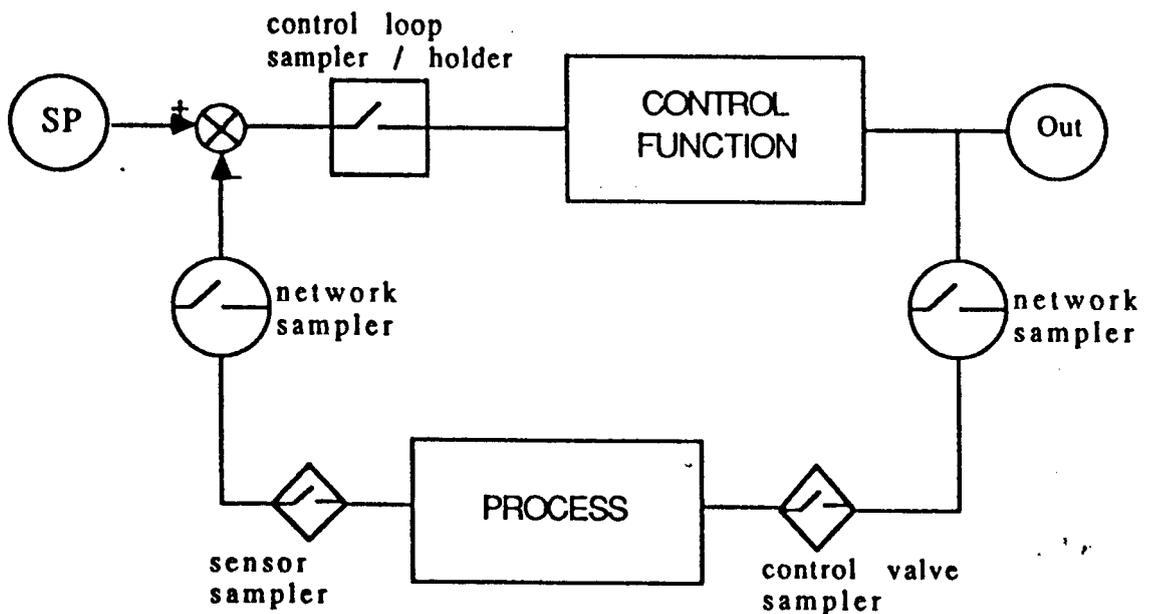


FIGURA 2.10 - "Field-bus" em controle realimentado de processos [EURE87]

A Foxboro propõe uma solução conciliatória de MAC, agrupando em um "extended data link layer" MAC's centralizados e distribuídos, com classes de serviços selecionáveis em função da configuração desejada [FOXBB9]. Contudo, esta proposta não apresenta uma solução para as restrições impostas pelo MAC distribuído, discutidas acima, e à aplicação do MAC centralizado em configurações multi-controlador.

Adicionalmente, são aspectos relacionados com a definição da camada enlace:

- o mecanismo e a capacidade de endereçamento: físico, lógico, de segmento, "multicast/broadcast", hierarquizado ou não;
- o controle de erros: CRC, paridade (distância de Hamming), número de retransmissões e as taxas de erro decorrentes (fig. 2.9);
- o controle de fluxo;
- as características dos "frames" (PDU's): campos, capacidade, padronização, etc., estreitamente relacionadas com a eficiência da camada enlace;
- o número de níveis de prioridade para cada tipo de serviço;
- a estratégia de implementação dos serviços e, em decorrência, a implicação sobre o desempenho e a eficiência da camada.

Quanto ao desempenho e a eficiência (da codificação e transferência de informação) da camada enlace, as propostas (fig. 2.9) caracterizam 2 grupos de valores: implementações de mais alto desempenho (ERA/MIL-STD-1553B, FIP) e implementações

de menor desempenho (PROFIBUS, Digital-Hart e Foxboro), sendo que algumas dentre as últimas não atendem aos requisitos estabelecidos pelos órgãos avaliadores (fig. 2.8), principalmente às indicações de mais alto desempenho.

d. Camada física:

Há consenso na adoção de duas classes de camada física, respeitando os requisitos ISA H1 e H2, estando em discussão a abrangência dessas classes e a definição de características específicas, tais como: taxas de transmissão, alcances, número de dispositivos, topologias e componentes associados (topologia básica sendo barramento): tronco, estrela, "home run", árvore, etc.

Existe uma tendência em se adotar par trançado e se utilizar a cablagem instalada de instrumentação para meio físico de H1 e somente se definir a interface exposta para os meios físicos de mais alto desempenho (H2 - par trançado, cabo coaxial, fibra-óptica) [NEMA188]. Outras tendências são: utilização de delimitadores físicos nos "frames", para garantir a distância de Hamming (4); codificação Manchester; modulação FSK (H2); e fixação de 3 taxas de transmissão [IEC488].

Adicionalmente, existem propostas de adoção de uma combinação de PROFIBUS e Digital Hart para camada física [NEMA188] e de soluções para combinar eficientemente: segurança intrínseca, alimentação via barramento e transmissão do padrão 4-20 mA no mesmo meio físico do sinal [WOOD288].

2.5 CONCLUSÃO

O presente capítulo apresentou uma visão geral do contexto do estudo do "field-bus", dando ênfase à sua caracterização, e a uma descrição do estado atual dos trabalhos em seus principais focos de discussão, na definição de cada camada.

Neste contexto, é de interesse se analisar, mais particularmente, os aspectos associados às restrições temporais e de confiabilidade do "field-bus" (item 2.3). Estes aspectos estão estreitamente relacionados com a definição da camada enlace, na qual destacam-se as seguintes questões:

- a adoção de MAC centralizado ou MAC distribuído;
- a inclusão ou não do controle de varredura do serviço periódico nas funções da camada enlace;
- a estratégia de implementação dos fluxos periódico, aperiódico e de mensagem, no que concerne a estratégia de divisão da banda útil entre os fluxos e a sua relação com os requisitos de processo;
- a eficiência na implementação dos serviços da camada enlace;
- a confiabilidade incorporada aos serviços da camada física pela camada enlace, através dos mecanismos de controle de erros.

A combinação desses fatores em uma implementação é entendida como um elemento para avaliar o desempenho da camada enlace.

O estudo que é desenvolvido nos capítulos seguintes se ocupa de avaliar o desempenho das implementações dos serviços da camada enlace de duas propostas candidatas à padronização, PROFIBUS (PROcess FieId BUS) e FIP (Factory Instrumentation Protocol/Flux Information Processus).

3. CRITÉRIOS E METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo do estudo de desempenho do PROFIBUS e do FIP é avaliar a melhor implementação de camada enlace sob diversos pontos de vista.

O presente capítulo definirá o foco de interesse do estudo de desempenho e os critérios e a metodologia para o seu desenvolvimento. À luz desta definição, serão descritas as camadas enlace do PROFIBUS e do FIP, nos aspectos que concorrem para o seu desempenho. Esta descrição abordará os seus elementos constituintes, serviços e temporizações características.

3.2 O ESTUDO DE DESEMPENHO

Entende-se como "Desempenho" de uma camada no modelo de referência OSI [DAY83], a medida da eficiência com que a mesma provê os serviços para a sua camada usuária. Esta definição é de caráter essencialmente genérico e a sua especificidade é decorrente dos seguintes fatores:

- a caracterização do objeto de avaliação nos serviços fornecidos à camada usuária;
- os critérios e os parâmetros de medição da eficiência, adotados na avaliação dos serviços.

3.2.1 Objeto da avaliação

O estudo de desempenho a ser desenvolvido se concentrará na avaliação da Camada Enlace de Dados, por:

- agregar as características e funções mais determinantes das restrições temporais de utilização do "field-bus", tais como: método de acesso ao barramento, controle de erros, prioridades, controle de temporizações, etc.;
- ser uma das camadas melhor definida atualmente, nas propostas de "field-bus", em termos de funções, serviços, temporizações e detalhes de implementação.

Neste estudo avaliar-se-á o comportamento individual de duas implementações de camada enlace, o PROFIBUS e o FIP, e desenvolver-se-á uma comparação entre os resultados obtidos.

O estudo restringir-se-á ao PROFIBUS e ao FIP, devido a:

- representarem dois tipos de implementações de MAC diametralmente opostas (centralizada/distribuída);
- incorporarem na camada enlace os controles de erros e de varredura do serviço periódico;
- suportarem aplicações complexas, através de implementações sensivelmente diferentes, tais como configurações multi-controlador;
- estarem entre as propostas mais fortemente representadas nos órgãos avaliadores.

3.2.2 Estratégia de medição de desempenho

Na análise de desempenho procurou-se avaliar a eficiência com que a camada enlace executa as funções

necessárias ao fornecimento dos seus serviços, através da medição de um conjunto de elementos observáveis pelos seus usuários. A definição destes elementos consistiu em se representar condições que pudessem ser medidas em implementações reais, na interface da camada enlace, e que permitissem uma comparação entre propostas sensivelmente distintas.

Para este fim, em função das diferenças de concepção entre o PROFIBUS e o FIP e, em decorrência, da dificuldade de uma comparação entre eles, adotou-se o modelo genérico de representação da camada enlace, apresentado na figura 3.1.

3.2.2.1 Modelo

O modelo da figura 3.1 caracteriza a forma com que a camada será avaliada, enfatizando a sua descrição à partir de uma configuração que interliga "n" controladores (usuários ativos) e "m" dispositivos de campo (usuários passivos). A informação que flui na camada enlace caracteriza 3 classes de fluxo de informação: periódico, aperiódico e de mensagem. A ocupação total da camada enlace (por estes 3 fluxos) caracteriza uma vazão máxima (Q_i), utilizada no fornecimento de uma capacidade de transmissão (Q_u) para os seus usuários. Os usuários da camada enlace são ativos ou passivos, em função da sua capacidade de ativar ou não os fluxos de informação.

A transferência de informação é feita a uma eficiência determinada (Q_u/Q_i) e está sujeita a perdas introduzidas por imperfeições no meio físico (P_p).

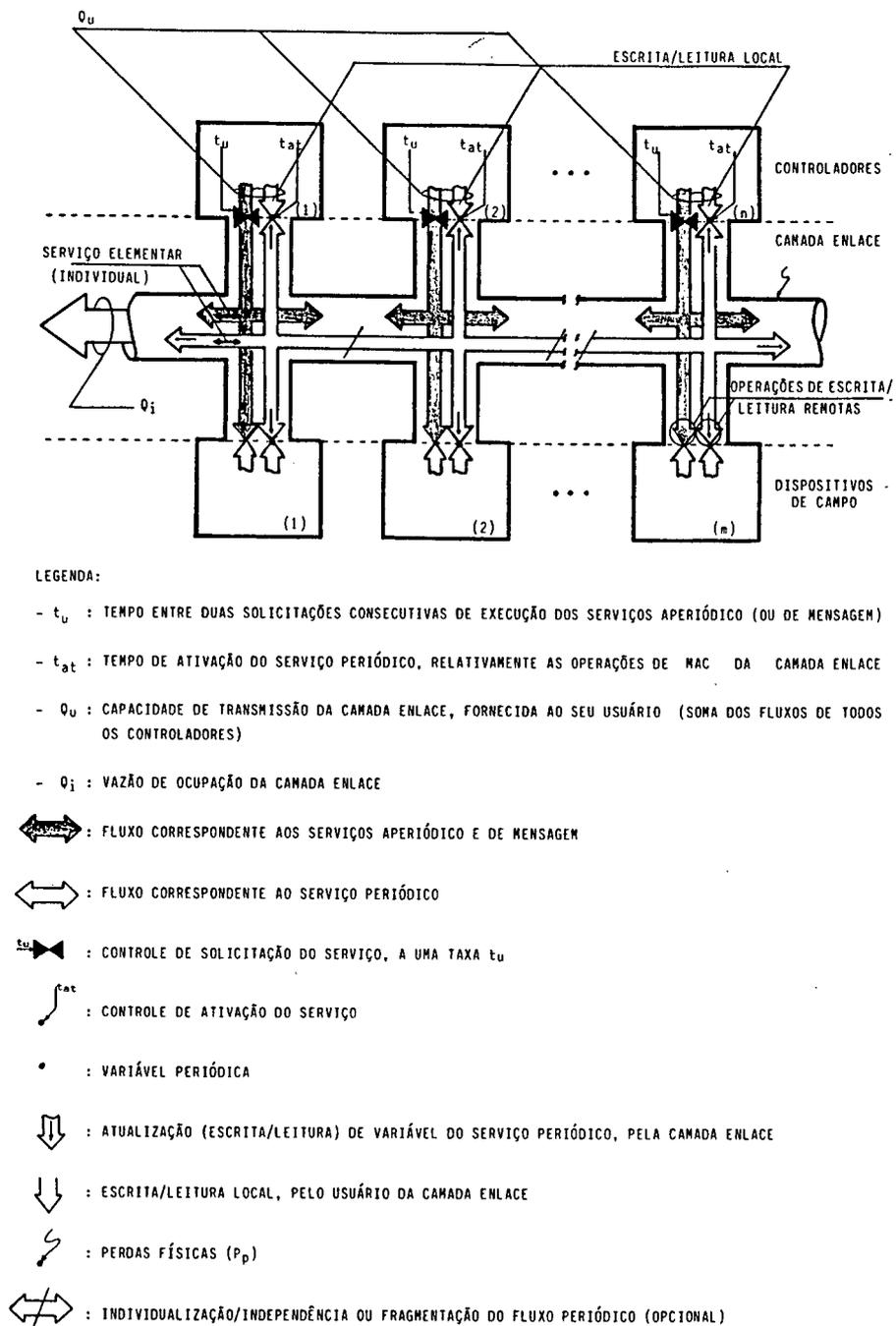


FIGURA 3.1 - Modelo de desempenho da camada enlace

Os 3 fluxos de informação são construídos à partir dos serviços elementares da camada, tais como: SDA, RDR, SDN, etc., também denominados no presente estudo de serviços individuais. Estes 3 fluxos concorrem entre si pela ocupação do tempo útil da camada, caracterizando os seguintes serviços:

a. Serviço periódico:

Este serviço é caracterizado pela atualização (leitura/escrita) automática de uma lista de variáveis, pela camada enlace.

A sua ativação (t_{at}) pode ocorrer uma vez na configuração do "field-bus", ou uma vez a cada ciclo do sistema, podendo ainda ser única (para todo o "field-bus") ou múltipla, com um controle de ativação em cada controlador, dependendo das características operacionais do "field-bus".

Em decorrência, o fluxo periódico pode ser sistêmico (planejado para todo o "field-bus") ou individualizado por controlador. No caso de individualização, haverão múltiplos fluxos periódicos no "field-bus", sendo um por controlador (fig. 3.1).

b. Serviços aperiódico e de mensagem:

Os fluxos aperiódico e de mensagem serão representados por uma mesma categoria, por diferirem basicamente no tamanho e frequência de ocorrência da informação, transferida nos seus serviços elementares.

Estes serviços são caracterizados pela ocorrência assíncrona (sem tempo determinado), sendo solicitados pelo usuário a uma taxa $1/t_u$, onde t_u é o tempo entre duas solicitações sucessivas. A solicitação é individualizada e independente em cada controlador.

Neste contexto, as características e funções sob responsabilidade da camada enlace, a serem utilizadas no fornecimento dos serviços para o seu usuário, são:

- distribuição do tempo útil do barramento entre as 3 classes de serviços, relacionadas com os fluxos de informação periódico, aperiódico e de mensagem, através de mecanismos de alocação fixa do barramento e/ou prioridades;
- controle de acesso ao barramento independente do seu usuário;
- transferência da informação do usuário (L_{sdu}), através de um mecanismo eficiente de codificação (Q_u/Q_i);
- controle de erros na transferência de informação, através dos procedimentos de checagem e retransmissão;
- controle da varredura e da periodicidade das variáveis, na execução do serviço periódico.

3.2.2.2 Elementos da avaliação de desempenho

Os elementos que serão utilizados na avaliação da eficiência de implementação destas funções são os seguintes:

- Capacidade de transmissão (Q_u), como uma medida da

- vazão da camada enlace em "mensagens(de tamanho determinado)/s" (msg/s);
- Controle de perdas finais (P_f), como uma medida da eficiência em reduzir o efeito das perdas físicas (P_p) sobre a informação;
 - Eficiência da codificação e transferência de informação (E%);
 - Qualidade dos serviços periódico, aperiódico e de mensagem, em função do que se espera do seu comportamento.

A análise combinada desses elementos caracteriza os critérios de avaliação de desempenho, utilizados no estudo da camada enlace.

Um "field-bus" que dispusesse de uma camada enlace ideal, forneceria para o seu usuário os serviços nas seguintes condições:

- a. Capacidade de transmissão (Q_u) infinita, o que significa que o serviço é executado instantaneamente, pois o barramento pode transmitir infinitas mensagens/s.
- b. Perdas finais (P_f) nulas, independentemente das perdas físicas (P_p).

- c. Eficiência da transferência de informação de 100 % ($Q_u/Q_i = 1$). Isto é, o usuário local do serviço transmite a informação para o usuário remoto sem qualquer "overhead" agregado à transferência de informação.
- d. Serviço periódico com garantia de periodicidade na execução das transações.
- e. Serviços aperiódico e de mensagem executados imediatamente após serem solicitados, sem qualquer atraso.

Tais condições para os elementos de desempenho não são alcançáveis na realidade, mas servirão como condições ideais em relação às quais avaliar-se-á o desempenho do PROFIBUS e do FIP.

3.2.3 Metodologia

O que determina o desempenho em cada proposta é a sua forma de implementação dos serviços. Desta forma, para o estudo de desempenho do PROFIBUS e do FIP, é necessário levantar-se a forma com que os mesmos implementam seus serviços. Concorrem na definição dos elementos de desempenho 2 conjuntos de características:

- operacionais: que definem a forma de implementação dos

serviços de cada proposta, à partir das suas operações internas;

- temporais: que definem os tempos e grandezas relacionadas com as interações entre as entidades, na implementação dos serviços.

A metodologia a ser adotada na obtenção dos elementos de desempenho, à partir das especificações de cada proposta, basear-se-á no estabelecimento de critérios para as análises operacional (enfocando o comportamento) e temporal (enfocando os tempos associados ao comportamento).

3.2.3.1 Critérios para a análise operacional

O conjunto de características operacionais importantes para a implementação interna dos serviços da camada é o seguinte:

- arquitetura: consistindo na sua organização geral, no controle de acesso ao meio físico e no mecanismo de endereçamento;
- serviços: consistindo nas funções e na forma de implementação dos serviços, suas entidades e prioridades envolvidas, suas primitivas e PDU's - Protocol Data Units (ou "frames") associados;
- controle de erros.

Deste conjunto de características, destaca-se em particular a descrição dos serviços da camada enlace, para a qual será utilizado o modelo da figura 3.2, onde:

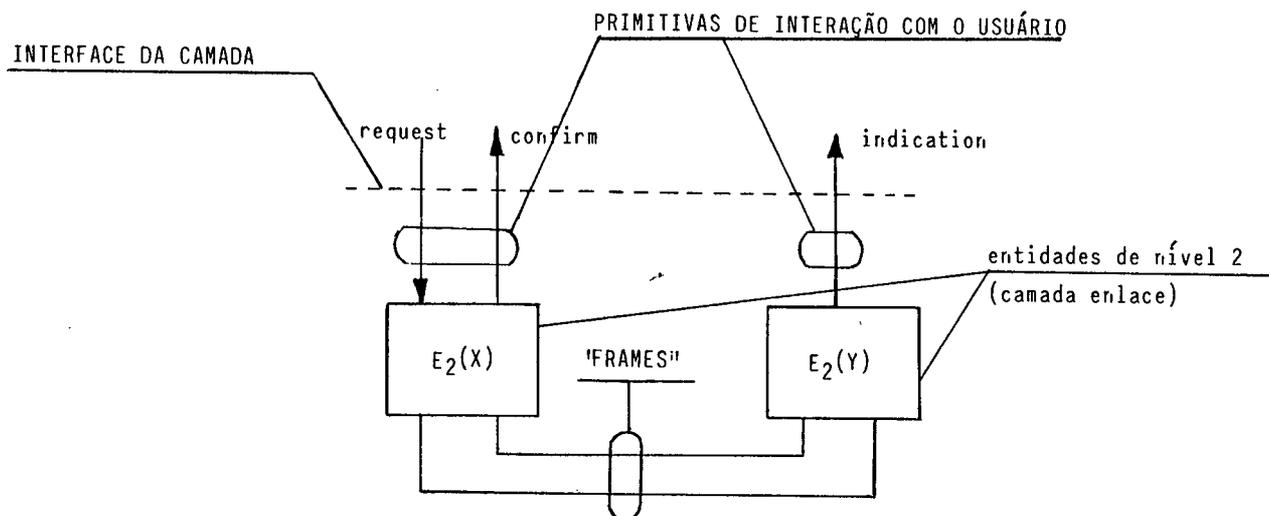


FIGURA 3.2 - Modelo de descrição dos serviços

- $E_2(X/Y)$ identifica a entidade da camada enlace;
- as primitivas de serviço são a interface lógica da camada com o seu usuário:
 - . "request": para solicitação do serviço pelo usuário local;
 - . "confirm": para confirmação da execução do serviço e transferência do resultado da execução do mesmo para o usuário local;
 - . "indication": para indicação do resultado da execução do serviço para o usuário remoto.
- os "frames" (PDU's): são os elementos dos procedimentos de comunicação entre as entidades.

Esta descrição evidencia as operações e estados internos de cada entidade e as suas interações com as suas camadas usuária e provedora.

3.2.3.2 Critérios para a análise temporal

Adicionalmente à descrição operacional, serão desenvolvidas representações dos serviços, através das interações entre as entidades envolvidas.

A representação gráfica do serviço, para explicitação dos tempos associados, utilizará o diagrama de barras, conforme descrito nas figuras 3.3. e 3.4, para o PROFIBUS e o FIP, respectivamente. Estes diagramas consistem em representações dos serviços elementares (fig. 3.1) do PROFIBUS e do FIP, que evidenciam as interações externas entre as entidades envolvidas na sua execução, bem como os tempos associados a essas interações.

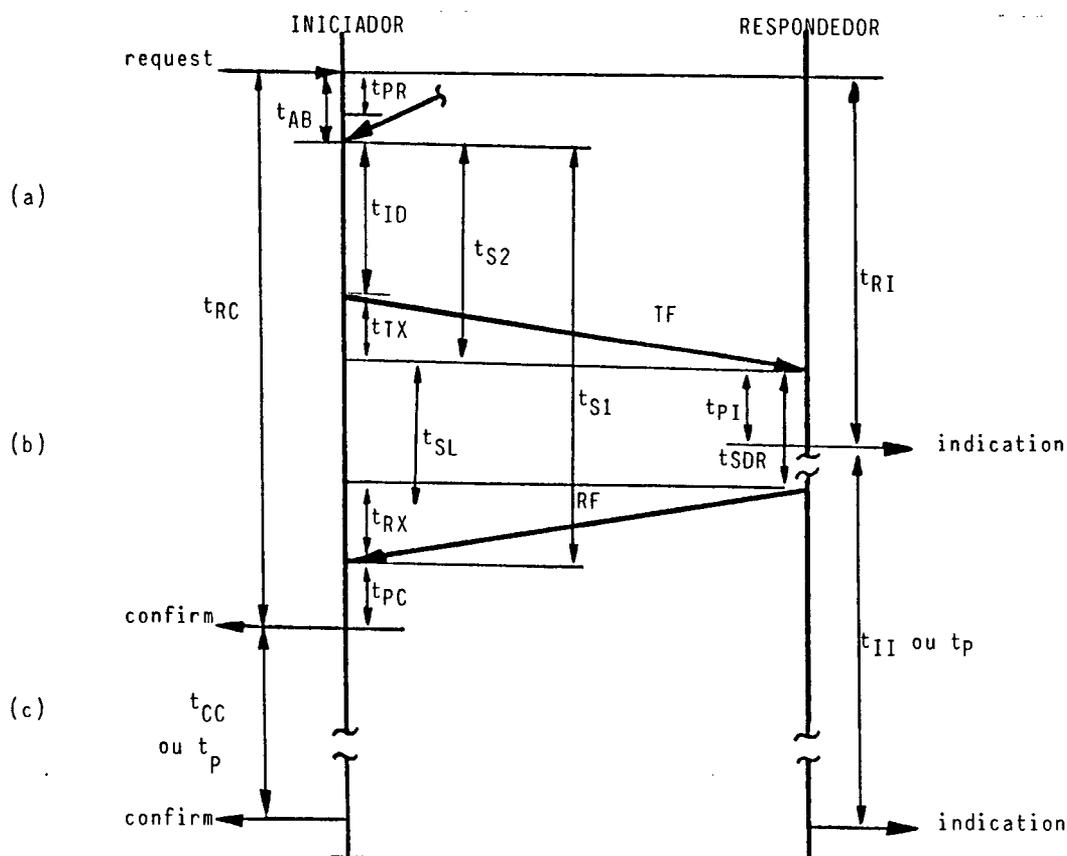


FIGURA 3.3 - PROFIBUS - Modelo básico do serviço

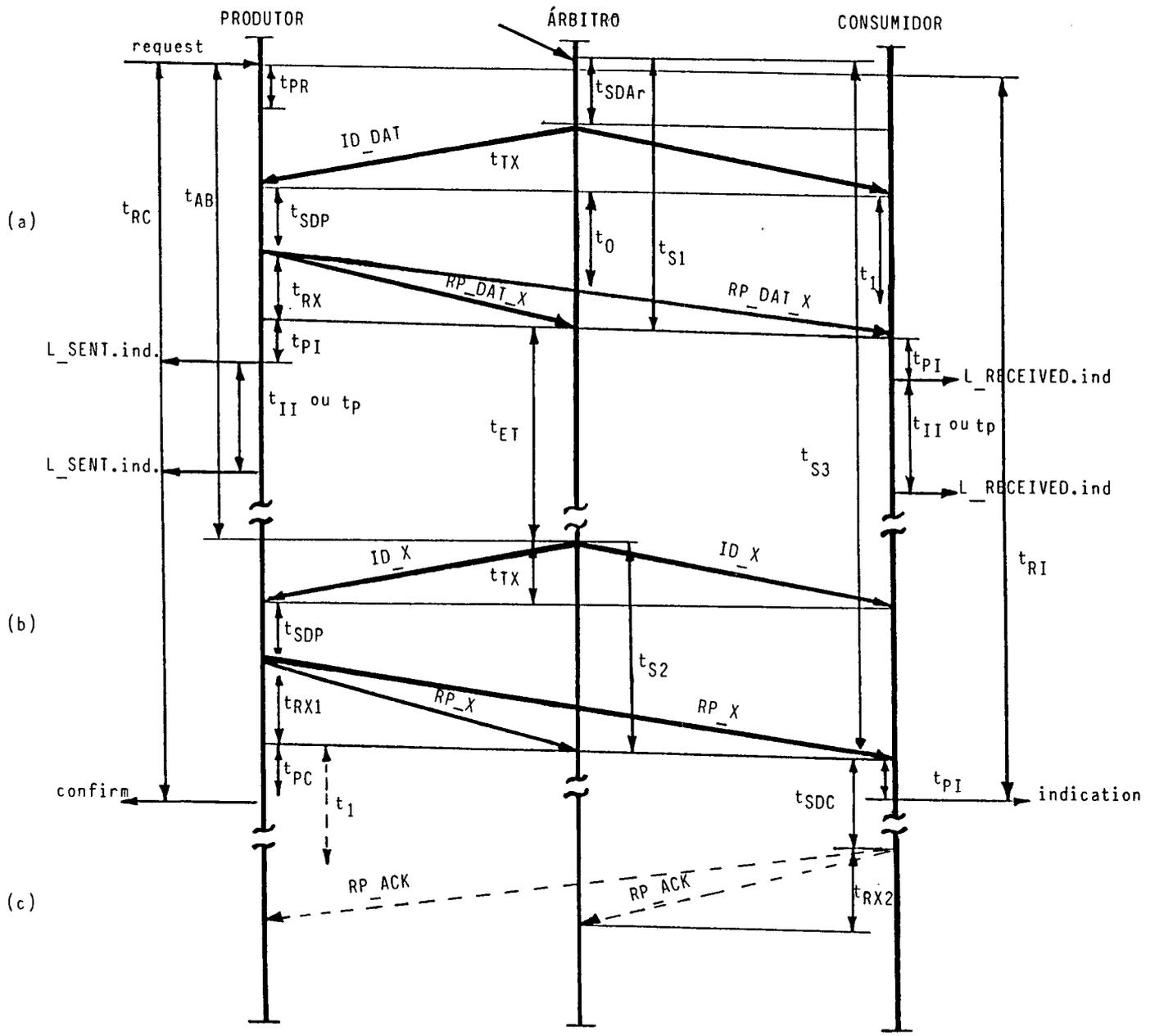


FIGURA 3.4 - FIP - Modelo básico do serviço

Com estes modelos é possível relacionar os tempos observáveis pelo usuário da camada enlace (indicados externamente às barras: t_{RC} , t_{RI} , " t_{AB} ", t_{IX} , etc.) com os tempos internos de implementação de cada entidade (t_{EDI} , t_{PR} , t_{RI} , etc.) e com os tempos sistêmicos (entre entidades da camada enlace - t_{TX} , t_{RX} , etc.), através de relações matemáticas entre os mesmos. À partir dos tempos observáveis pelo usuário da camada enlace, ou através de combinações desses tempos, pode-se obter os indicadores relacionados com os elementos de desempenho já citados.

No caso do PROFIBUS, o modelo da figura 3.3 apresenta casos de solicitação e execução de um serviço:

- sem reconhecimento (t_{AE}): (a);
- com reconhecimento (t_{AI}): (a) e (b).

O segmento (c) representa outras transações adicionais de um serviço periódico e o seu relacionamento com a transação precedente ("a" e "b"), através de t_{CC} .

No caso do FIP, o modelo da figura 3.4 apresenta a execução de 3 modalidades de serviço:

- serviço cuja iniciação é comandada pelo árbitro (a);
- serviço cuja iniciação é comandada pelo produtor (ou consumidor) (a) e (b);
- serviço com reconhecimento pelo consumidor (a), (b) e (c).

No segmento (a) está representada a execução de uma transação individual do serviço periódico. Nos segmentos (a) e (b) a requisição de um outro serviço (aperiódico ou de mensagem) é transferida do produtor para o árbitro (a) e executada no tempo

apropriado (t_{ET} após) pelo árbitro (b). Adicionalmente, a transmissão pode ser confirmada ou não pelo consumidor (c).

O interesse fundamental desses modelos é a possibilidade de representação do conjunto de variáveis da análise temporal (tempos do usuário e tempos internos/sistêmicos), a serem definidas a seguir. Cabe observar que a terminologia adotada na designação dos tempos, quando definida, é derivada das especificações das propostas. A maioria dos tempos é representada segundo a designação do PROFIBUS, por ser a proposta que melhor define seus tempos internos e sistêmicos.

a. Tempos do usuário:

- tempo (t_{RC}) entre a ocorrência das primitivas "request" e "confirm", que indica ao usuário o tempo do serviço na estação local. Em alguns casos, ao invés de t_{RC} , se adotará t_{EB} (tempo de execução de um serviço), que caracteriza o tempo de serviço para o "field-bus" como um todo (com $t_{RB} = 0$) e não somente do ponto de vista da estação local;
- tempo (t_{RX}) entre a ocorrência de uma primitiva "request" (na estação local) e a primitiva "indication" correspondente (na estação remota), que indica o tempo de transmissão da informação entre usuários finais.
- tempo de acesso ao barramento (t_{AB}), medido entre a recepção de uma primitiva "request" (pela camada

enlace) e o instante de início da execução do serviço correspondente, que é uma medida do tempo de resposta da camada (atraso ou inércia). t_{PB} varia com o instante em que a primitiva "request" é ativada, em relação aos estados sistêmicos (p.ex. ocupação do barramento por outras estações) e com os estados da E_p local (p.ex. número de serviços precedentes).

- tempo entre duas transferências de informação do serviço periódico, que é uma medida da periodicidade na execução do mesmo nos usuários local e remoto. As transferências podem ser duas transações sucessivas relativas a uma dada variável (t_{II}/t_{CC}) ou podem ser a primeira e a última transação do serviço periódico (t_p - tempo de execução das n_p transações do serviço periódico).
- tempo de reação do sistema (t_{BR}), não indicado nos modelos das figuras 3.3 e 3.4, é o o tempo de execução de um ciclo de serviços do sistema. Em configurações munidas de fluxo periódico, consiste no tempo entre duas execuções sucessivas do serviço periódico ou de uma determinada transação do mesmo.

Estes tempos dependem de parâmetros internos e sistêmicos.

b. Tempos internos e sistêmicos:

- tempos de transmissão do "frame" iniciador (t_{TX}) e do "frame" resposta (t_{RX}): estes tempos decorrem do atraso de propagação do sinal na linha física entre duas (ou mais) estações (t_{TD}) e dos "frames" de transmissão (t_{TF}) e recepção (t_{RF}):

$$t_{TX} = t_{TF} + t_{TD} \text{ e}$$

$$t_{RX} = t_{RF} + t_{TD};$$

- . t_{TD} : varia de 0 a t_{TDmax} , que é definido pela relação:

$$t_{TDmax} = K \cdot \frac{l}{c},$$

onde:

- . K é a constante do meio físico;
- . l é o comprimento do meio físico;
- . c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^{10}$ km/s).
- . t_{TF} e t_{RF} : tempos de transmissão dos "frames" gerados pelo iniciador e respondedor, respectivamente, para o PROFIBUS. No FIP, a identificação será ainda do tipo t_{PDU} , onde PDU é a sigla do "frame" em questão.

- t_{EDi} : tempo de reação da entidade "i", medido entre a recepção do último bit do "frame" anterior e o início da reação correspondente, onde "i" pode indicar as seguintes entidades:

- i = (I)niciadora/(R)espondedora, no PROFIBUS;

- i = (A)rbítrio/(P)rodutor/(C)onsumidor, no FIP.

Por exemplo, t_{EDR} : tempo de reação da entidade respondedora do PROFIBUS; t_{EDP} : tempo de reação da entidade produtora do FIP.

- "time-outs" (t_o , t_1 e t_2 , no FIP/ t_{EDL} , no PROFIBUS) de espera local pela ocorrência de uma reação numa estação remota.

- tempos de processamento internos, dependentes da implementação:

. t_{PR} : tempo de processamento de uma primitiva "request";

. t_{PC} (t_{PI}): tempo de processamento de uma primitiva "confirm" ("indication"), medido entre identificação de conclusão do serviço e a sua indicação ao usuário local (remoto).

- t_{ET} : tempo entre duas transações ou fases de um serviço. No PROFIBUS, é o tempo entre duas transações periódicas. No FIP, é o tempo entre duas fases dos serviços aperiódico e de mensagem.

Outros fatores que também interferem na determinação destes tempos de usuário são os seguintes:

- taxa de transmissão;
- taxa de geração de informações: nos serviços aperiódico e de mensagem, é a taxa de solicitação de execução dos mesmos (msg/s), medida através do tempo entre solicitações: t_{LUP} , para o serviço aperiódico e t_{LM} , para o serviço de mensagem;
- taxa de perdas físicas: percentual de perdas médias de PDU's devido à não idealidade do meio físico;
- prioridade da informação de interesse (alta - H, ou baixa - L) em relação as informações concorrentes, para transmissão pela entidade local;
- número de transações periódicas, aperiódicas e de mensagem consideradas;
- dimensão das filas de transmissão e recepção nas entidades (aperiódicas - nUP ou de mensagem - nM);
- outros parâmetros internos de configuração de cada "field-bus", tais como: distância de Hamming, formato do "frame" adotado, tipo de implementação, etc.

No PROFIBUS depende-se, adicionalmente, do número de estações presentes no barramento, agregadas a controladores (mestres) e a dispositivos (escravas).

3.2.3.3 Relação com os elementos de desempenho

A definição dos elementos de desempenho e a sua obtenção à partir das temporizações acima, é descrita a seguir:

a. Capacidade de transmissão (Q_u):

Q_u é uma medida da vazão do "field-bus" e do seu desempenho médio na execução dos serviços individuais. Os resultados de Q_u serão parametrizados com as indicações de desempenho da ISA e NEMA (tabela da figura 2.8), que caracterizam os "field-bus" H1 e H2.

Especificamente, os resultados de interesse são o inverso dos t_{RC} (quando $t_{RC} = t_B$) no PROFIBUS e t_B no FIP, em função do percentual de perdas físicas e das opções de configuração de cada "field-bus", para implementações H1 e H2.

As restrições ao comportamento ideal - item 3.2.2 (Q_u tendendo para infinito) são decorrentes da limitação da taxa de transmissão (f) e do "dead-time" [ISA187] intrínseco a camada enlace.

b. Controle de perdas:

O controle de perdas é uma medida da capacidade da camada enlace de corrigir e controlar as perdas introduzidas na informação pela camada física. Especificamente, os resultados de interesse são os valores percentuais das perdas finais (P_f), observáveis pelo usuários da camada enlace, em função do percentual de perdas físicas (P_p) e do número de retransmissões da transação (n_r), quando houver.

As restrições ao comportamento ideal ($P_f = 0$ para qualquer P_p) são decorrentes de n_r ser finito.

c. Eficiência da transferência de informação (E%)

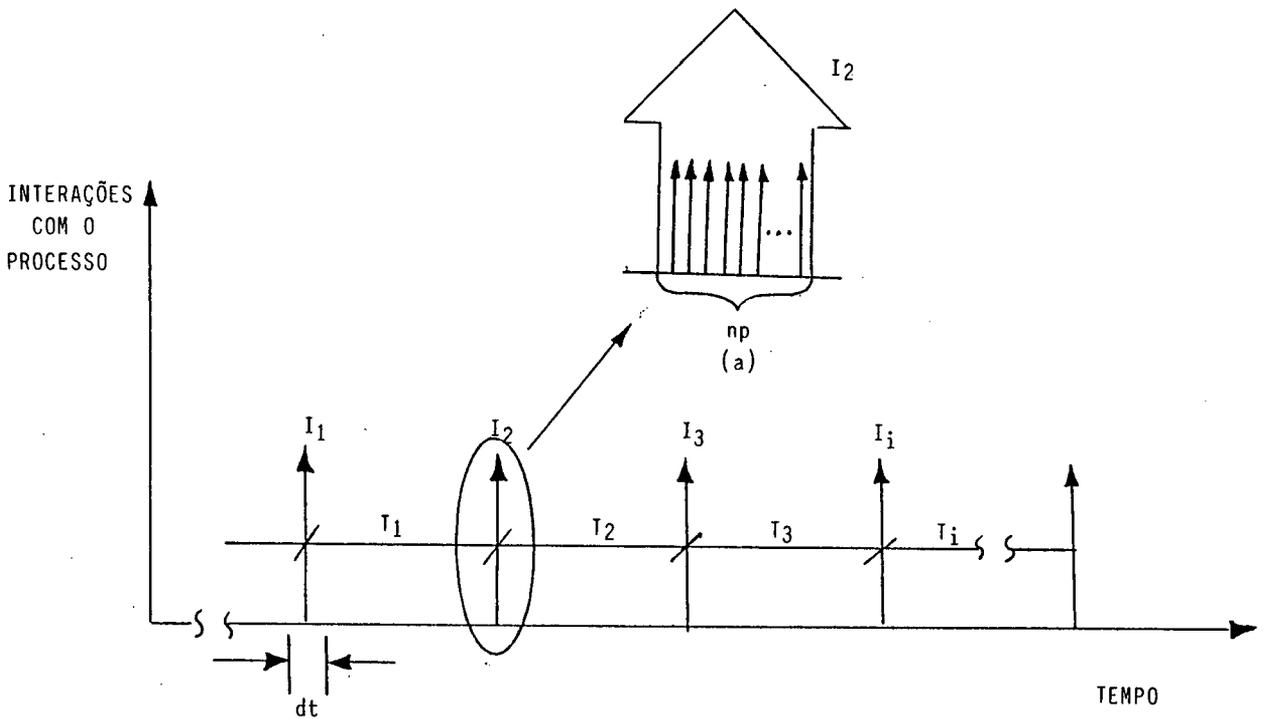
E% é uma medida da "overhead" em PCI ("Protocol Control Information") e tempos de reação, introduzidos pela camada enlace na transferência de uma informação do seu usuário (L_sdu). Especificamente, os resultados de interesse são a fração percentual L_sdu/t_e (tempo líquido do L_sdu, em bits de informação transformados em unidades de tempo, dividido pelo tempo do serviço para a sua transferência), em função da dimensão do L_sdu, para as distintas opções de serviços e configuração.

As restrições ao comportamento ideal (E% = 100%) são decorrentes das características do protocolo de comunicação (que agrega um PCI ao SDU a ser transferido): codificação do "frame", protocolo de controle de erros e tempos de reação das entidades.

d. Qualidade do serviço periódico:

Além do desempenho temporal, decorrente dos resultados anteriores, o serviço periódico é qualificado pela uniformidade e periodicidade com que é executado (fig. 3.5).

Por uniformidade entende-se a concentração (proximidade mútua) com que as n_p transações do serviço periódico, correspondentes a uma determinada interação (I) com o processo (fig. 3.5.a), são executadas. A uniformidade está relacionada com t_p e, idealmente, t_p deveria ser nulo, o que significa que o conjunto de transações relativas a uma dada interação com o



PERIODICIDADE: $T_1 \equiv T_2 \equiv T_3 \equiv T_i$ (t_{SR})
 UNIFORMIDADE: $dt \rightarrow 0$ (t_p)

FIGURA 3.5 - Tempos do serviço periódico

processo é executado em um mesmo instante. As restrições ao comportamento ideal (se não para t_p nulo, pelo menos as n_p transações consecutivas) são decorrentes das perturbações devido aos serviços aperiódico e de mensagem concorrentes e à não disponibilidade permanente do barramento.

Por periodicidade entende-se a repetibilidade e a identidade dos tempo T_i , associadas aos ciclos de processo. Idealmente, $T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_i = t_{SR}$. As restrições ao comportamento ideal são as mesmas de t_p .

As medições de desempenho sobre t_p e t_{SR} são as seguintes:

d.1 Tempo de execução do serviço periódico (t_p):

Os resultados de interesse são o tempo médio e o desvio na execução de n_p transações periódicas, em função: do número de controladores do "field-bus" (n) e do instante de ativação do serviço periódico (t_{at}).

d.2 Tempo de reação do sistema (t_{BR}):

Os resultados de interesse são o tempo médio e o desvio: entre duas execuções sucessivas do serviço periódico.

Adicionalmente, t_p e t_{BR} são medidos em função da taxa de requisição paralela, pelo usuário da camada enlace, da execução dos serviços aperiódicos e de mensagem (t_{LUP} e t_{LM}), para as distintas opções de serviços e configuração (mono/multi-controlador).

e. Qualidade do serviço aperiódico (e de mensagem):

Similarmente ao serviço periódico, além do desempenho decorrente de "a", "b" e "c", o serviço aperiódico (e em menor nível, o de mensagem) é qualificado pelo atraso entre a solicitação de execução do serviço pelo usuário local e a sua efetiva execução. Este atraso caracteriza a "inércia" da camada enlace, refletida no tempo de acesso ao barramento (t_{AB} - tempo entre a solicitação de um serviço e o início da sua execução).

Contudo, em termos de grandezas mensuráveis na interface da camada enlace, t_{AB} é indiretamente caracterizado por t_{RC} (no PROFIBUS) e t_B (no FIP - assumido como tempo de usuário nos serviços em que a iniciação é comandada pelo árbitro), obtidos em configurações onde há interferência mútua entre os serviços.

t_{RC} e t_B são obtidos das medições do tempo de execução de um certo número de serviços aperiódicos (nUP) ou de mensagem (nM), sobre o qual se faz uma média, em diversas condições e combinações dos serviços, que caracterizem a problemática de concorrência e de disponibilidade do barramento.

Idealmente, o atraso da camada enlace deveria ser nulo. Isto é, o serviço é executado imediatamente após ser solicitado. As restrições ao comportamento ideal são decorrentes dos mesmos fatores que restringem t_p .

Os três primeiros elementos de desempenho ("a", "b" e "c") qualificam os serviços elementares (fig. 3.1) do "field-bus" (serviços individuais). Os dois últimos ("d" e "e"), construídos à partir de combinações dos serviços individuais, além de considerarem o desempenho dos serviços elementares, medem a qualidade da implementação das 3 classes de serviços.

É importante notar que os resultados a serem obtidos caracterizarão o comportamento médio dos tempos de usuário. Nos resultados dos itens "a", "b" e "c" a média envolverá as variações nas temporizações internas e sistêmicas. Nos resultados "d" e "e" a média incluirá ainda as variações decorrentes das condições dinâmicas do "field-bus".

A seguir serão apresentados os resultados da aplicação desta metodologia ao PROFIBUS e ao FIP, através das análises operacional e temporal, visando a caracterização dos elementos de desempenho em cada proposta.

3.3 PROFIBUS

As descrições que seguem são um resumo das análises operacional e temporal, desenvolvidas para o PROFIBUS [AGUI189] [AGUI489].

3.3.1 Análise Operacional

A camada enlace do PROFIBUS está baseada nas normas: IEEE 802.4 - "token bus", Proway/IEEE 802.2 (SDA/SDN) [IEC286]; ISO 2022 - Asynchronous Data Communication; DIN 19244 [DIN87] e ISA S72.01 [ISA85], com adaptações para operar a taxas de transmissão entre 9,6 e 500 kbps. Adicionalmente, os "frames" são definidos conforme IEC TC57 [IEC285] [IEC385].

3.3.1.1 Arquitetura

A camada enlace está, em termos de funções, dividida em 2 subcamadas, LLC e MAC, sem uma interface formal entre as duas.

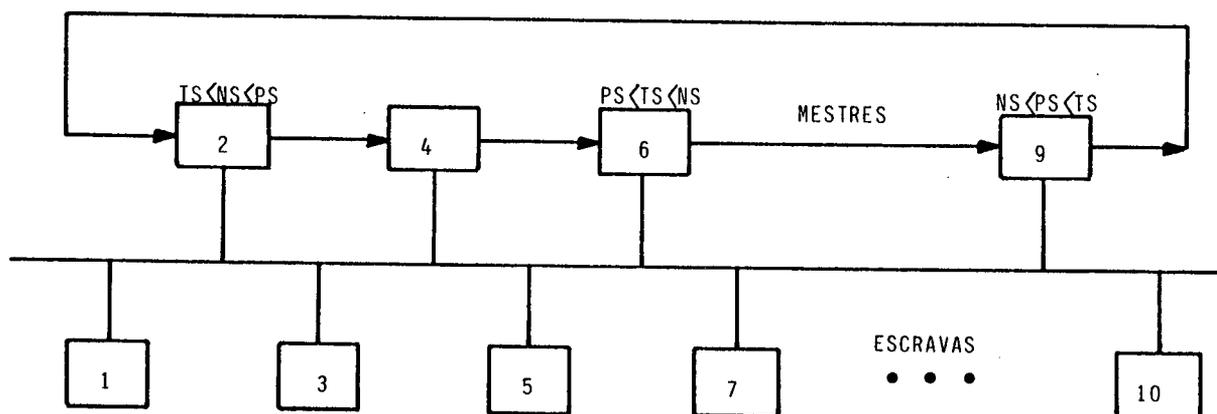
a. Controle de acesso ao meio físico (MAC):

O MAC do PROFIBUS é híbrido, com a transferência de informação através de mestre-escravo, baseado no IEC-TC 57 [IEC285] e ISO-1177, e a transferência do mestre através de

"token-passing", baseado no IEEE 802.4. O mestre é sempre o iniciador do serviço, quando de posse do "token", e o escravo só transmite quando requisitado pelo mestre, não havendo possibilidade de comunicação cruzada entre estações escravas.

O protocolo para transferência do "token" permite o direito de acesso ao barramento a "n" estações mestre, por um tempo determinado (t_{TH} - máximo tempo permitido para que uma estação mestre retenha o "token"), à partir do qual a estação deve passar o "token" para a estação seguinte. A sucessiva passagem do "token" entre as estações configura um anel (lógico) - fig. 3.6, cujo tempo de "rotação" (duas recepções sucessivas por uma dada estação) t_{RR} , obedece as especificações de projeto, definidas na fase de configuração do PROFIBUS (t_{TR}).

ANEL LÓGICO DE ESTAÇÕES MESTRES COM A DIREÇÃO DE PASSAGEM DO "TOKEN"



LEGENDA:

TS = ESTAÇÃO ATUAL

NS = ESTAÇÃO SEGUINTE

PS = ESTAÇÃO ANTERIOR.

FIGURA 3.6 - PROFIBUS - Anel lógico

A introdução e retirada de estações do anel lógico é feita através de um mecanismo específico de construção e manutenção do mesmo, baseado em uma lista (LMS) de estações ativas. A LMS é construída e mantida em cada estação mestre, a partir da escuta da linha, o que a permite conhecer o seu antecessor (PS), o seu sucessor (NS) e o seu próprio endereço (TS). O "token" é passado através de um "frame" específico (sem reconhecimento) de um mestre para o seu sucessor, em ascensão numérica de endereços (das estações mestre presentes na LMS), até o endereço mais alto (HSA), que transmite para o endereço mais baixo. De posse do "token", uma estação pode transmitir/requisitar dados ou procurar na sua GAP_list (endereços compreendidos entre TS e NS da LMS) por outras estações que quiserem entrar no anel lógico, dentro do seu limite de tempo para retenção do "token". Esta estratégia de construção e manutenção do anel lógico só é viável para as taxas de transmissão suportadas pelo PROFIBUS.

b. Mecanismos de endereçamento:

O PROFIBUS utiliza endereçamento hierarquizado: físico, de segmento e lógico (LSAP), com 63 endereços lógicos por estação, associados aos seus LSAPs, e 126 endereços físicos em um segmento de rede. A utilização de endereçamento lógico (LSAP) e a expansão da capacidade de endereçamento físico (individual ou simultaneamente) são opcionais.

O PROFIBUS suporta endereçamento ponto-a-ponto, "broadcast", mas não suporta endereçamento "multicast" e todas as comunicações são sem conexão.

3.3.1.2 Serviços

a. Entidades:

A camada enlace possui duas classificações de entidades:

- segundo a direção do fluxo de informação: produtoras (P) e/ou consumidoras (C): $E_{\text{P}}(C)$, $E_{\text{P}}(P)$, $E_{\text{P}}(P/C)$, $E_{\text{P}}(C/P)$;
- segundo a estação em que residem (a nível MAC): iniciadoras ou respondedoras.

b. Descrição detalhada dos serviços:

Os serviços da camada enlace do PROFIBUS são os seguintes, classificados conforme o fluxo de informação:

- Serviço aperiódico e de mensagem:
 - . Envio de informação com reconhecimento (SDA - Send Data with Acknowledge);
 - . Leitura remota de informação (RDR - Request Data with Reply);
 - . Intercâmbio de informação (SRD - Send and Request Data with Reply);
 - . Envio de informação sem reconhecimento (SDN - Send Data with No acknowledge).

- Serviço periódico

- . Leitura periódica remota de informação (CRDR - Cyclic Request Data with Reply);
- . Intercâmbio periódico de informação (CSRD - Cyclic Send and Request Data with Reply).

Está sendo analisada [SIEM88] a criação de um serviço periódico universal (UCS), para uma generalização do CRDR e do CSRD.

Uma descrição das funções e operações associadas a cada serviço é apresentada a seguir.

b.1 Envio de informação com reconhecimento (SDA):

Permite ao usuário local (na estação iniciadora) enviar informações (L_{sdu}) para um (único) usuário remoto, com confirmação de recebimento pelo usuário remoto.

A sequência de interações associadas à execução do serviço é apresentada na figura 3.7.a, onde $E_a(P)$ gera um "frame" SDAL ou SDAH, segundo a prioridade requerida pelo usuário. Se $E_a(P)$ não recebe uma resposta de $E_a(C)$, retransmite somente uma vez. No período compreendido entre uma transmissão e a espera pelo reconhecimento ("slot-time"), nenhuma outra transmissão pode ocorrer.

b.2 Envio de informação sem reconhecimento (SDN):

Permite ao usuário local (na estação iniciadora) enviar informações (L_{sdu}) para um usuário remoto ou difundir

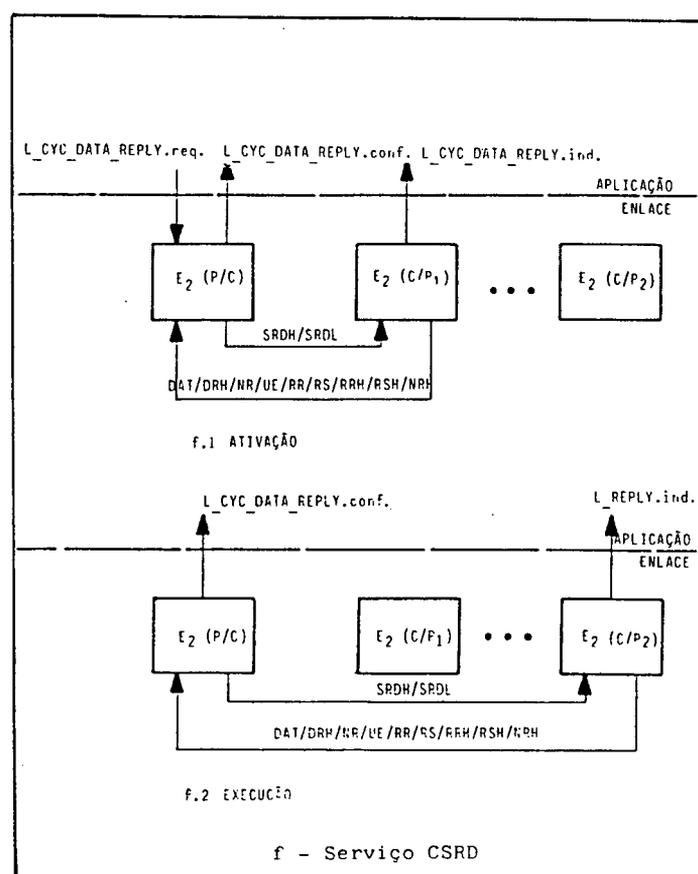
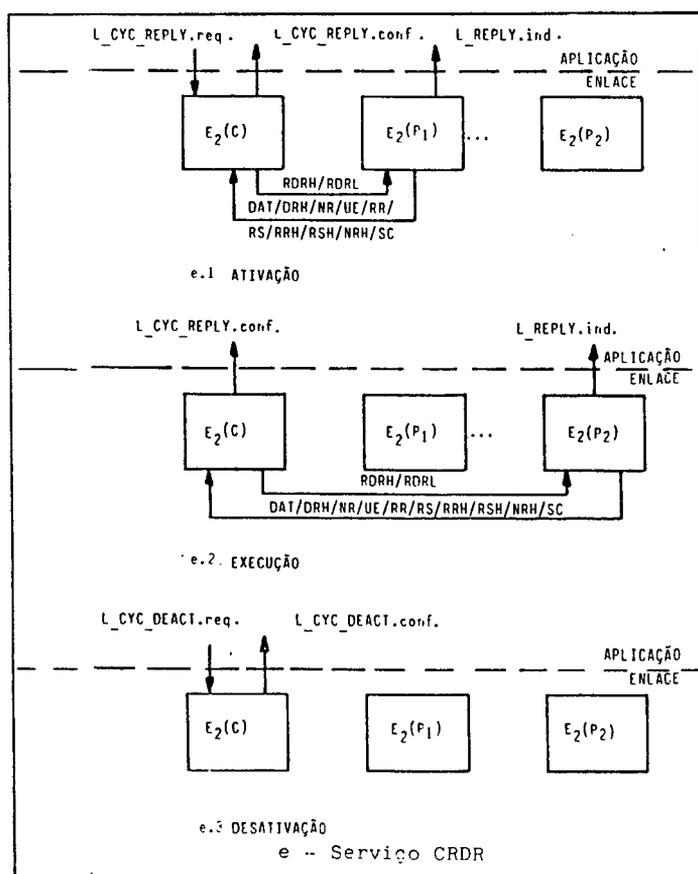
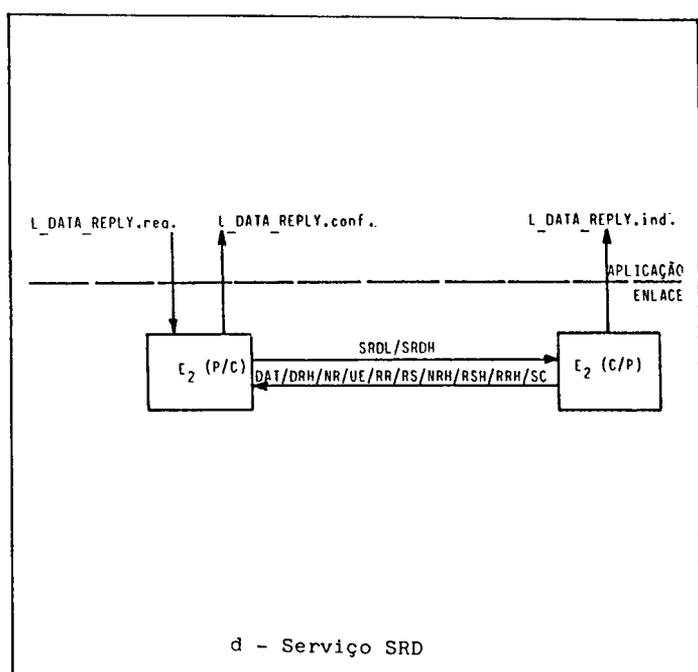
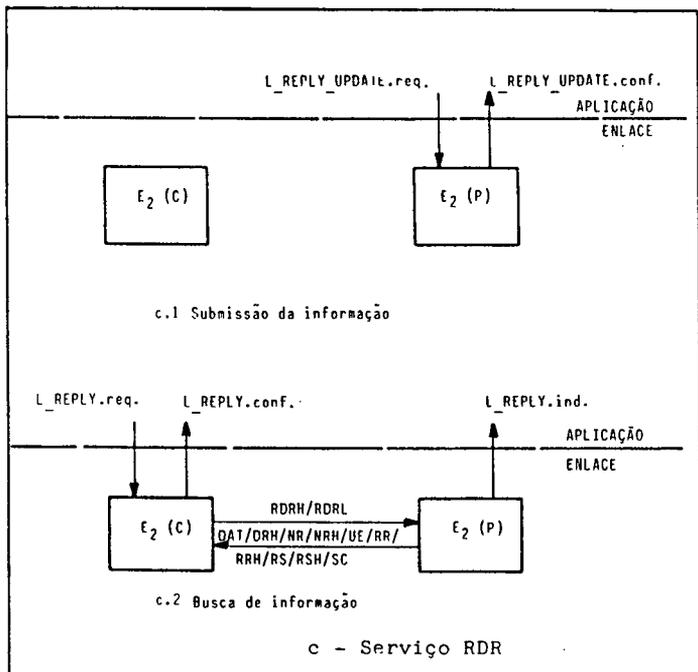
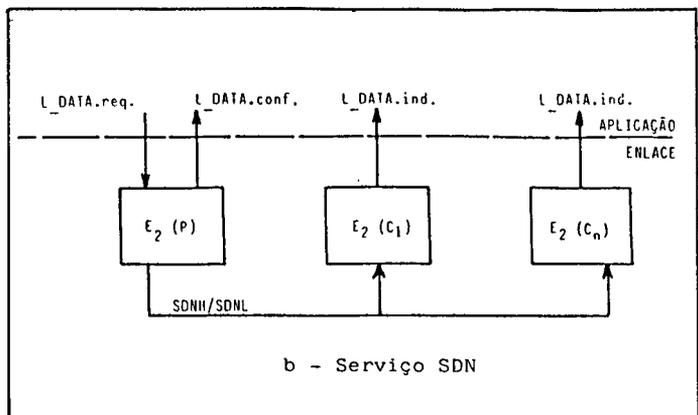
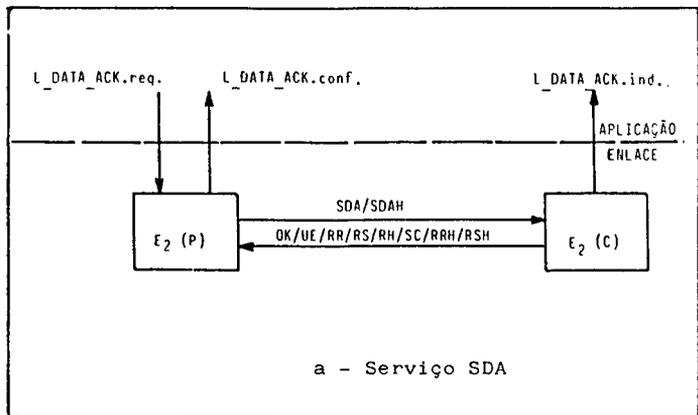


FIGURA 3.7 - PROFIBUS - Serviços da camada enlace

informações para todos os usuários remotos simultaneamente, sem receber confirmação de recebimento do(s) mesmo(s).

A sequência de interações associadas à execução do serviço é apresentada na figura 3.7.b, onde $E_e(P)$ transmite o "frame" SDNL/SDNH para $E_e(C)$, segundo sua prioridade, sem esperar reconhecimento.

b.3 Leitura remota de informação (RDR):

Permite ao usuário local ler remotamente uma informação (L_sdu), que foi previamente colocada a disposição pelo usuário na estação remota. O usuário local recebe a informação ou uma indicação de que a mesma não está disponível.

A sequência de interações associadas à execução do serviço é apresentada na figura 3.7.c. A submissão da informação (fig. 3.7.c.1) é uma operação local e consiste em uma escrita num "buffer". A busca de informação (fig. 3.7.c.2) inicia com a transmissão do "frame" RDRL/RDRH por $E_e(C)$, segundo a sua prioridade. $E_e(P)$ responde com a informação solicitada ou com NR/NRH, caso a informação não esteja disponível.

b.4 Intercâmbio de informação (SRD):

Permite ao usuário local enviar e ler informações para/de um usuário remoto, simultaneamente. Este serviço é uma combinação dos serviços SDA e RDR.

A sequência de interações associadas à execução do serviço é apresentada nas figuras 3.7.c.1, para a fase de submissão da informação e 3.7.d para a fase de transmissão e busca da informação.

Na transmissão e busca de informações (fig. 3.7.d), $E_m(C/P)$ inicia a transação com um SRDL/SRDH e $E_m(C/P)$ responde com um NR/NRH ou SC, no caso da informação não estar disponível, ou com a informação solicitada.

b.5 Leitura periódica remota de informação (CRDR):

Permite ao usuário local ler periodicamente informações (L_sdu), colocadas a disposição por um ou mais usuários remotos. O usuário local recebe, para cada RDR executado, a informação ou uma indicação de que a mesma não está disponível.

A sequência de interações associadas à execução do serviço é apresentada nas figuras 3.7.c.1, para submissão da informação e 3.7.e, para ativação, execução e desativação. A ativação (fig. 3.7.e.1) é iniciada pelo usuário local, que repassa para $E_m(C)$ a lista de usuários remotos para varredura (Poll_list). A execução (fig. 3.7.e.2) inicia imediatamente após $E_m(C)$ concluir a presente transação ou tomar posse do "token" (fig. 3.7.e.1 e 3.7.e.2), e consiste na contínua leitura remota de cada usuário indicado na Poll_list. O serviço pode ser interrompido temporariamente para execução de serviços aperiódicos (prioridade maior) ou pela expiração de t_{TH} . A desativação (fig. 3.7.e.3) é iniciada pelo usuário local e

executada por $E_m(C)$, imediatamente após completar a Poll_list no ciclo em execução.

b.6 Intercâmbio periódico de informação (CSR):

Permite ao usuário local intercambiar periodicamente informações (L_sdu) com um ou mais usuários remotos, similarmente ao CRDR.

A sequência de interações associadas a execução do serviço é apresentada nas figuras 3.7.c.1, para submissão da informação, 3.7.f.1 para ativação, 3.7.f.2 para execução e 3.7.e.3 para desativação do serviço, similarmente ao serviço de leitura periódica.

c. Prioridades:

O PROFIBUS define dois níveis de prioridade na organização das filas de transmissão da camada enlace: alta ou urgente (alarmes, sincronização, coordenação, etc.); baixa ou menos urgente (diagnóstico do processo, carga de programas, etc.).

Em termos das prioridades relativas entre serviços, ao receber o "token" a estação mestre executa as transações em suas filas na seguinte sequência:

- se possui tempo disponível para reter o "token" (t_{TH}):
 - . as transações aperiódicas/de mensagem de alta prioridade;
 - . as transações periódicas de alta e baixa prioridade;

- . as transações aperiódicas/de mensagem de baixa prioridade.
- não dispondo de t_{TH} : uma transação aperiódica/de mensagem de alta prioridade.

d. "Frames" (PDU's):

No PROFIBUS os "frames" são do tipo FT 1.1 e FT 1.2 [IEC285] [IEC385], caracterizados por duas distâncias de Hamming (2 e 4, respectivamente) e diversas opções de formatos de "frames", compostos de um número variável de caracteres. Cada caracter é composto de 11 bits (8 de informação e 3 de controle). Os formatos genéricos dos tipos de "frames", em seus diversos campos componentes, são apresentados na figura 3.8. Na figura 3.9 é apresentada uma lista dos "frames" do PROFIBUS, referida ao campo de controle FC dos "frames" e onde: a coluna "sigla" é um identificador utilizado no item "b", a coluna "formato" é o número de sequência associado aos formatos da figura 3.8.

O PROFIBUS possui 5 categorias de "frames":

- passagem do "token";
- manutenção do GAP_list;
- transferência de informação aperiódica/de mensagem confirmada;

| Nº | COMPOSIÇÃO | DESCRIÇÃO | HD | Tamanho (bit) | Estação |
|----|--|-------------------------------|----|------------------------|------------|
| 1 | SYN SD1 DA SA FC FCS ED | Controle | 4 | 99 | Primária |
| 2 | SD1 DA SA FC FCS ED | | | 66 | Secundária |
| 3 | SYN SD3 DA SA FC DATA UNIT FCS ED | Dados de tamanho fixo | 4 | 187 | Primária |
| 4 | SD3 DA SA FC DATA UNIT FCS ED | | | | Secundária |
| 5 | SYN SD2 LE LEr SD2 DA SA FC DATA UNIT FCS ED | Dados de tamanho variável | 4 | 132+DATA ^{*1} | Primária |
| 6 | SD2 LE LEr SD2 DA SA FC DATA UNIT FCS ED | | | 99+DATA | Secundária |
| 7 | SYN SD3 LE D/SA FC | Controle | 2 | 77 | Primária |
| 8 | SD3 LE D/SA FC | | | 44 | Secundária |
| 9 | SYN SD3 LE D/SA FC DATA UNIT | Dados de tamanho variável | 2 | 77+DATA ^{*2} | Primária |
| 10 | SD3 LE D/SA FC DATA UNIT | | | 44+DATA ^{*2} | Secundária |
| 11 | SYN SD4 DA SA | Token (passagem de permissão) | 2 | 66 | Primária |
| 12 | SC | Reconhecimento curto | | 11 | Secundária |

*¹ - max DATA = 244 byte
 *² - max DATA = 29 byte

FIGURA 3.8 - PROFIBUS - Formato dos "frames"

- transferência de informação periódica confirmada;
- transferência de informação aperiódica/de mensagem não confirmada.

3.3.1.3 Controle de Erros

A detecção de erros pelo receptor é feita a nível de bit (NRZ e bits de start/stop); caracter (paridade/8 bit); "frame" (8 bit de CRC/"frame") e entre "frames" (bits FCB/FCV, para erros de duplicação dos "frames" de ação do iniciador).

A detecção de erro pelo transmissor é feita através da temporização de espera pela resposta (t_{ML}) e retransmissão da mensagem uma única vez.

| IR | IE | IS | IM | IE | CÓDIGO | FUNÇÃO | FORMATO | SIGLA/ESTADO |
|----|----|----|----|----|--------|---|--------------------|--------------|
| 1 | | | | | | !Reservado IEC TC-57 | | |
| | | | | | | !"Frames" "Send" e/ou "Request" - estação primária | | |
| | | | | | | !"Frame" "Acknowledgement/Response" - estação primária | | |
| 1 | 0 | 0 | | | | !Função bit alternado: - FCB inválido | | |
| 1 | x | 1 | | | | - FCB válido x=0 ou x=1 | | |
| 1 | 1 | 0 | | | | - inicialização do FCB | | |
| 0 | 0 | 0 | | | | !Função bits de estado: - estação passiva | | |
| 0 | 0 | 1 | | | | - estação ativa não pronta | | |
| 0 | 1 | 0 | | | | - estação ativa pronta p/"anel" | | |
| 0 | 1 | 1 | | | | | | |
| 1 | x | x | 0 | 0 | 0 | !Reservado p/IEC, TCS7, p.5-2 - cód. 0 e 2 | | |
| | | | 0 | 0 | 0 | !Reservado p/IEC, TCS7, p.5-2 - cód. 0 e 2 | | |
| | | | 0 | 0 | 1 | !Reservado p/IEC, TCS7, p.5-2 - cód. 0 e 2 | | |
| | | | 0 | 0 | 1 | !Envio informação com reconhecimento - (lo-pri) | (enlace)13,5,9 | SDNL |
| | | | 0 | 1 | 0 | !Envio de informação sem reconhecimento - (lo-pri) | (enlace)13,5,9 | SDNL |
| | | | 0 | 1 | 0 | !Envio de informação com reconhecimento - (hi-pri) | (enlace)13,5,9 | SDNH |
| | | | 0 | 1 | 0 | !Envio de informação sem reconhecimento - (hi-pri) | (enlace)13,5,9 | SDNH |
| | | | 0 | 1 | 1 | !Reservado p/requisição de dados de diagnóstico | (gestão)1 | - |
| | | | 1 | 0 | 0 | !Reservado p/IEC TCS7, p. 3-2 - cod. 8 | - | - |
| | | | 1 | 0 | 0 | !Leitura do estado da entidade remota | (gestão)11,7 | RLR |
| | | | 1 | 0 | 1 | !Leitura remota de informação - (hi-pri) | (enlace)11,3,5,7,9 | ADRH |
| | | | 1 | 0 | 1 | !Leitura remota de informação - (lo-pri) | (enlace)11,3,5,7,9 | RDRL |
| | | | 1 | 1 | 0 | !Intercambio de informação - (lo-pri) | (enlace)13,5,9 | SRDL |
| | | | 1 | 1 | 0 | !Intercambio de informação - (hi-pri) | (enlace)13,5,9 | SRDH |
| | | | 1 | 1 | 1 | !Leitura de identificação | (gestão)11,7 | RIR |
| 0 | x | x | 1 | 1 | 1 | !Leitura do estado do LSAP da entidade remota | (gestão)11,3,5,7,9 | RSR |
| | | | 0 | 0 | 0 | !Reconhecimento positivo | 12,8/12 | UK |
| | | | 0 | 0 | 0 | !Reconhecimento negativo:erro interface c/usuário remoto | 12,8 | UE |
| | | | 0 | 0 | 1 | !Reconhecimento negativo:recurso n disponível/entid.remota | 12,8 | RR |
| | | | 0 | 1 | 0 | !Reconhecimento negativo:serviço n ativado no LSAP remoto | 12,8 | RS |
| | | | 0 | 1 | 0 | !Reconhecimento positivo:entid. remota esperando um RDR - (hi-pri) | 12,8 | RH |
| | | | 0 | 1 | 1 | !Reconhecimento negativo(RR):entid. remota esperando RDR - (hi-pri) | 12,8 | RH |
| | | | 0 | 1 | 1 | !Reconhecimento negativo(RS):entid. remota esperando RDR - (hi-pri) | 12,8 | RSH |
| | | | 1 | 0 | 0 | !Reservado | - | - |
| | | | 1 | 0 | 0 | !Informação (L_sda/gestão) | 14,6,10 | DAT |
| | | | 1 | 0 | 1 | !Reconhecimento negativo: informação não disponível | 12,8 | NR |
| | | | 1 | 0 | 1 | !Informação e entidade remota esperando um RDR - (hi-pri) | 14,6,10 | DRH |
| | | | 1 | 1 | 0 | !Reconhecimento negativo(NR):enti. remota esperando um RDR - (hi-pri) | 12,8 | NRH |
| | | | 1 | 1 | 0 | !Reservado | - | - |
| | | | 1 | 1 | 1 | !Reservado | - | - |
| | | | 1 | 1 | 1 | !Reservado | - | - |

FIGURA 3.9 - PROFIBUS - Identificação dos "frames"

3.3.2 Análise temporal

Neste item serão caracterizados os tempos associados aos serviços do PROFIBUS, seus valores e a sua aplicação em cada serviço, segundo o modelo da figura 3.3. Especificamente, serão definidos os tempos de usuário e a sua relação com os principais tempos internos e sistêmicos.

3.3.2.1 Tempos do usuário (fig. 3.3)

a. Tempo entre as primitivas "request" e "confirm" (t_{RC}):

$$t_{RC} = t_{AB} + t_B$$

$$t_{RC} = t_{AB} + t_{ID} + t_{TX} + t_{ORDR} + t_{RX} + t_{PC}$$

b. Tempo entre as primitivas "request" e "indication" (t_{RI}):

se assumirá que:

$$t_{RI} = t_{RC}$$

c. Tempo de execução do serviço periódico (t_P):

$$t_P = t_{AB} + t_{ORDR} + t_{PC}$$

$$t_P = t_{AB} + \sum_{i=1}^{N_P} t_{RDRI} + \sum_{i=1}^{N_P} t_{ETI} + t_{PC}$$

onde:

- t_{RDRI} : é o tempo de um serviço RDR individual;
- t_{ETI} : definido no item 3.2, tem um comportamento equivalente a t_{AB} .

d. Tempo entre execuções do serviço periódico (t_{PR}):

comporta-se equivalentemente a t_P , no PROFIBUS.

e. Tempo de acesso ao baramento (t_{AR}):

Definido no item 3.2 (fig.3.3), t_{AR} é constituído de 3 componentes, sendo definido relativamente a uma primitiva "request" especifica:

$$\begin{array}{l} \text{!-----!} \\ \text{!}t_{AR} = t_{PR} + t_{AT} + t_{BP} \text{!} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

onde:

- t_{BP} , consiste do tempo de execução dos serviços precedentes de prioridade maior ou igual, presentes na fila de espera da

camada enlace, quando a estação tem a posse do "token". t_{EP} é somente limitado pelas dimensões das filas de espera para transmissão da camada enlace.

- t_{AT} : é o tempo de aquisição do "token", por uma estação, medido após t_{PR} .

$$t_{AT} = \sum_{i=0}^x t_{RRi} \quad , \quad x \in N^+$$

No caso onde se considera t_{RRi} constante:

$$\begin{array}{l} \text{!-----!} \\ t_{AT} = t_{RR0} + x \cdot t_{TR} \text{ !, sendo } t_{RR0} = t_{TR} \text{ (rotação} \\ \text{!-----!} \text{ em curso)} \end{array}$$

Se $t_{EP} > t_{TH}$, temos que $x > 0$. Considerou-se $t_{RR} = t_{TR}$, o que não ocorre efetivamente, podendo t_{RR} divergir de t_{TR} :

- t_{RR} : tempo efetivo de rotação do "token", é o tempo entre sucessivas recepções do "token" por uma estação mestre, em 2 ciclos distintos;
- t_{TR} : tempo nominal de rotação do "token", é o tempo projetado, entre sucessivas recepções do "token" por uma estação mestre. t_{TR} é definido segundo uma relação que estabelece condições médias de projeto [SIEM88].

A título de ilustração, para uma capacidade de enfileiramento de mensagens de $m.t_{TH}$ ($m \in \mathbb{N}^+$) os valores máximo e mínimo de t_{AB} são:

$$\boxed{!t_{ABmin} = t_{PR} !},$$

para:

- posse do "token" ou monomestre;
- sem serviços precedentes.

$$\boxed{!t_{ABmax} = t_{PR} + t_{TH} + m.t_{TR} !},$$

para:

- "request" emitido quando a estação acaba de liberar o "token";
- máxima ocupação das suas filas com serviços de prioridade igual ou superior.

Assim, $(t_{ABmax} - t_{ABmin})$ representa uma faixa bastante larga de variação para t_{AB} , principalmente para serviços de baixa prioridade em uma alta taxa de utilização do barramento.

3.3.2.2 Tempos internos - fig. 3.3 (determinantes dos tempos do usuário)

a. Definição:

- a.1 t_{EDR} , t_{TX} , t_{RX} : definidos no item 3.2; para t_{TF} e t_{RF} da figura 3.8.

a.2 t_{ID} :

É o tempo ocioso que uma estação mestre (iniciadora) precisa esperar antes do final de um "frame" (transmitido ou recebido) e o início do seguinte, para garantir a distância de Hamming e a sincronização dos circuitos dos receptores:

$$t_{ID} = \max (t_{BYN} + t_{EM}, t_{DI}) \text{ [ms]},$$

sendo:

- t_{BYN} : período correspondente a 33 bit, compondo o campo SYN dos "frames" iniciadores (fig. 3.8). Consiste de um período de linha ociosa necessário à sincronização dos circuitos codificador/decodificadores do transmissor e receptores;
- t_{EM} , margem de segurança para t_{ID} em relação a t_{BYN} , considerando atrasos nos circuitos de codificação/decodificação, tempos de estabilização dos circuitos de linha e tempos de "software".

a.3 "Time-slot" (t_{SL}):

Consiste no máximo tempo que uma estação iniciadora espera entre o término da transmissão de um "frame" e o início de uma resposta à referida transmissão, conforme indicado na figura 3.10, onde é importante observar que:

- a implementação do MAC do PROFIBUS é baseada em UART ("Universal Asynchronous Receiver Transmitter - controller"), que recebe um "frame" caracter-a-

- caracter. Assim, o receptor só reconhece que está recebendo, quando o primeiro caracter for completamente recebido e armazenado na UART, levando t_{SM} para parar o temporizador que mede t_{ML} na estação iniciadora (fig. 3.10);
- considera-se que o transmissor tem capacidade de reconhecer o instante em que o último bit do "frame" que está transmitindo está presente na camada física, para iniciar a contagem de t_{ML} .

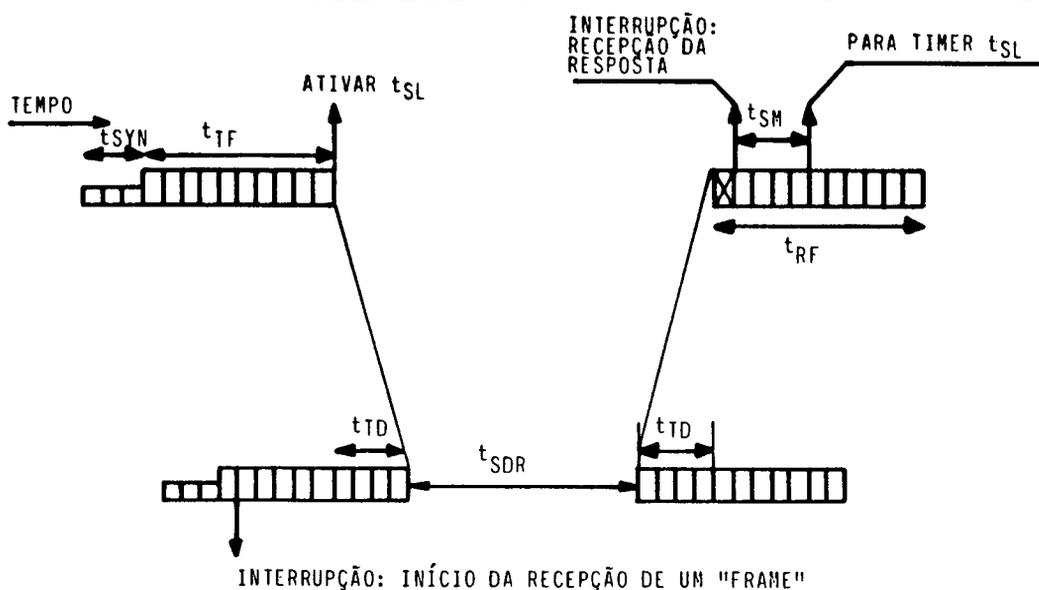


FIGURA 3.10 - PROFIBUS - Time-slot (t_{ML})

Estes fatores interferem em t_{ML} , da forma indicada na figura 3.11, onde são apresentadas as suas diversas condições

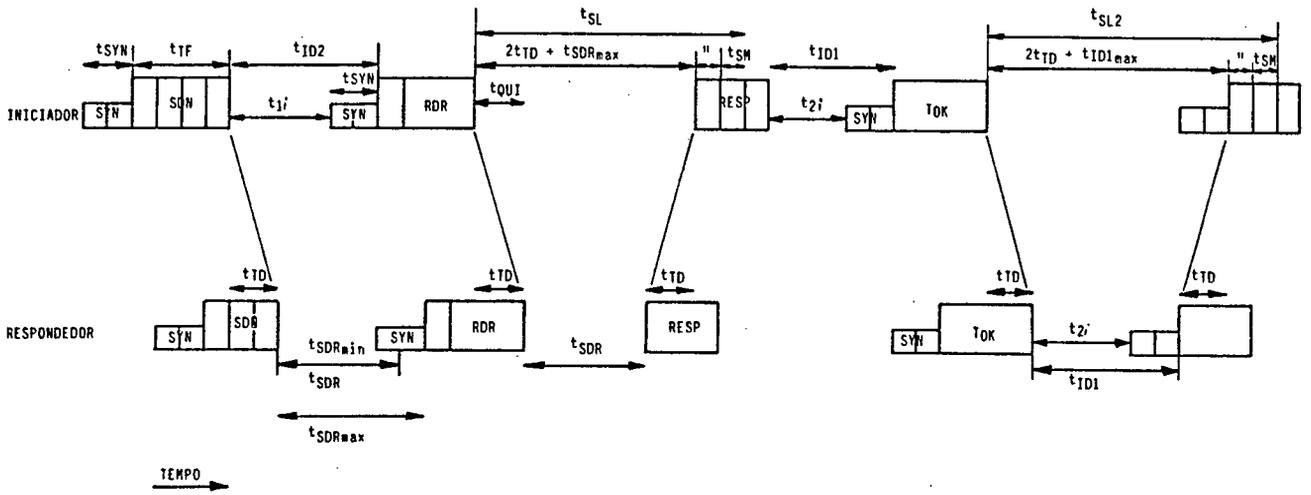


FIGURA 3.11 - PROFIBUS - Exemplos de aplicação de t_{SL}

de aplicação em diagramas de transferência de dados e do "token". Nestas condições, a equação resultante, a ser aplicada em t_{SL} é a seguinte:

$$t_{SL} = 2 \cdot t_{TD} + t_{SDRmax} + 11 + t_{EM} \quad [\text{bit}],$$

onde o fator "11" é o tempo de transmissão de um caracter completo do "frame" (item 3.3.1.2.d). Consiste no caracter marcado com "X" na figura 3.10 (t_{CAR}).

b. Valores:

O PROFIBUS apresenta uma grande multiplicidade de opções de configuração, para a definição dos valores os tempos

internos, que os modificam diretamente, resultantes do seguinte conjunto de condições (nº de opções):

- tipo de implementação da estação (2);
- distância de Hamming adotada (2);
- configurações mono/multi-controlador (2);
- taxas de transmissão (5);
- tipos de "frame" resposta (2).

Alia-se a isto as condições de desempenho a serem submetidas:

- diversidade de tipos de implementações para as distintas aplicações: H1 e H2 (2);
- variação no número de estações: 2 a 30;
- variação no número de estações mestres 1 a 30;

que dentre outras, implicam um grande número de condições de configuração.

Desta forma, definiu-se um conjunto de condições médias de operação, que considera esta diversidade de opções. Os valores resultantes foram obtidos de indicações de desempenho, à partir das informações contidas nas especificações [DIN87] [SIEM87] [SIEM88]. Definiu-se faixas de variação possíveis para os tempos em função do agrupamento das diferentes condições de configuração em 2 classes:

b.1 Implementação tipo "C" [SIEM87] (f = 9,6 kbps e 90 kbps):

A implementação tipo "C" é típica de baixas velocidades e caracterizada pela utilização de um único processador, compartilhado entre os protocolos de comunicação e o "software"

de aplicação. Os intervalos dos tempos de especificação das implementações tipo "C", neste contexto, são os seguintes:

$$t_{BRD} = [0,4 ; 0,5] \text{ [ms]}$$

$$t_{ID} = [3,4 ; 3,8] \text{ [ms] a 9,6 kbps}$$

$$= [0,4 ; 0,6] \text{ [ms] a 90 kbps}$$

t_{TF} , t_{RF} dependem da dimensão do L_{sdu} transmitido, tipo de serviço e da distância de Hamming adotada (fig. 3.8).

b.2 Implementação tipo "B" [SIEM87] ($f = 90$ e 500 kbps):

A implementação tipo "B" é típica de altas velocidades e caracterizada pela utilização de 2 processadores, um dedicado aos protocolos de comunicação e o outro ao "software" de aplicação. Os intervalos dos tempos de especificação das implementações tipo "B", neste contexto, são os seguintes:

$$t_{BRD} = [0,13 ; 0,15] \text{ [ms]}$$

$$t_{ID} = [0,15 ; 0,25] \text{ [ms] a 500 kbps}$$

$$= [0,4 ; 0,6] \text{ [ms] a 90 kbps}$$

t_{TF} , t_{RF} : similares à implementação tipo "C".

A criação dessas 2 categorias com os dados de especificação implicou em se assumir as seguintes simplificações:

- a implementação tipo "C" é concebida para as aplicações do "field-bus" H1, cujas taxas limites de transmissão são 9,6 kbps e 90 kbps;

- a implementação tipo "B" é concebida para as aplicações do "field-bus" H2, cujas taxas limites de transmissão são 90 kbps e 500 kbps;
- as distâncias de Hamming 2 e 4 podem coexistir em um mesmo "field-bus", o que implica numa variação do tempo t_{BDR} na implementação tipo "B";
- as diferenças entre os valores obtidos para uma dada implementação, em uma dada taxa de transmissão, nas configurações monomestre e multimestre é pouco significativa;
- as diferenças em termos de tempo de processamento, para diferentes quantidades de estações escravas são desprezíveis.

b.3 Determinação de t_{BL} :

t_{BL} é dependente do tipo de implementação:

. Implementação tipo "C":

$t_{BL} = 21 \text{ bit (2,19 ms)}$, para $f = 9,6 \text{ kbps}$

$t_{BL} = 74 \text{ bit (0,82 ms)}$, para $f = 90 \text{ kbps}$

. Implementação tipo "B":

$t_{BL} = 105 \text{ bit (0,21 ms)}$, para $f = 500 \text{ kbps}$

3.3.2.3 Análise dos serviços

As relações temporais genéricas, definidas acima, foram aplicadas a cada um dos serviços do PROFIBUS, à partir da representação dos mesmos segundo o modelo da figura 3.3. Esta análise, apresentada em detalhes no Anexo 7.1, permitiu a

obtenção das equações que relacionam os tempos de usuário em cada serviço, com os tempos internos e sistêmicos, em diversas condições de erro e retransmissão.

3.3.2.4 Controle de ocupação do barramento

No PROFIBUS, o controle da execução dos seus diversos serviços é distribuído entre as estações mestre. Os serviços vão sendo executados na medida em que são solicitados, segundo a sua prioridade e conforme a disponibilidade do barramento. A implementação dos fluxos de informação dos serviços periódico, aperiódico e de mensagem se dá da seguinte forma:

a. Serviço periódico:

O controle de periodicidade está diretamente relacionado com os serviços CRDR/CSRD, executados em cada estação mestre. Nestes serviços há somente o controle da varredura das variáveis, não havendo controle dos instantes de ativação e desativação do serviço.

Os instantes de execução das transações do serviço periódico, como qualquer serviço do PROFIBUS, não são determinados, sendo definidos em função do instante em que são solicitados pelo usuário e da sua prioridade relativa aos demais serviços da camada enlace. Esta flexibilidade na multiplexação temporal do meio físico, traz restrições

importantes para a periodicidade das atualizações do serviço periódico, que passam a depender dos seguintes fatores:

- o volume, a regularidade e a prioridade dos serviços aperiódicos e de mensagem precedentes (em configurações mono e multi-controlador);
- o tempo necessário para a execução das transações da "Poll_list", em relação ao tempo t_{TH} disponível (multi-controlador);
- o instante em que o serviço é ativado, relativamente ao instante de recepção do "token". A ativação do serviço em determinados instantes pode fragmentar a execução da "Poll_list".

Assim, em configurações mono-controlador, o serviço periódico é perturbado por serviços paralelos de maior prioridade ou com precedência. Em configurações multi-controlador, alia-se a esta perturbação a possível existência de rotações do "token" durante a execução da "Poll_list", devido a limitações em t_{TH} .

b. Serviços aperiódico e de mensagem:

No PROFIBUS, os fluxos de informação aperiódico e de mensagem são implementados através dos mesmos serviços individuais (SDA, SDN, RDR e SRD). Não há a alocação de um intervalo de tempo específico para a sua execução, que ocorre segundo a sua prioridade relativa em relação aos demais serviços.

3.4 FIP

As descrições que seguem são um resumo das análises operacional e temporal desenvolvidas para o FIP [AGUI289] [AGUI489].

3.4.1 Análise operacional

A camada enlace do FIP está baseada nas normas ISO 8802 e ISA-SP50 [ISA187], mas suas características básicas são derivadas de sua concepção original [GALA84], principalmente em suas transações dos serviços periódico e aperiódico.

3.4.1.1 Arquitetura

No FIP as subcamadas MAC e LLC não são formalmente definidas, sendo que algumas de suas funções são coincidentes (LSAPS e MSAPS, nos serviços periódico e aperiódico, por exemplo).

a. Controle de acesso ao meio físico:

O método de controle de acesso ao meio do FIP é centralizado e baseado na comunicação cruzada entre estações secundárias.

A entidade árbitro (item 3.4.1.2) é a responsável pela geração ordenada do direito de acesso e por indicar para as entidades produtoras a informação a se transferir, através do seu identificador.

O mecanismo de acesso ao barramento pode ser dividido em 4 etapas:

- o árbitro difunde um identificador pelo barramento (fig. 3.12.a);
- as entidades produtora e consumidora(s) reconhecem o identificador (fig. 3.12.b);
- a entidade produtora difunde a informação, associada ao identificador (figura 3.12.c);
- a(s) entidade(s) consumidora(s) capta(m) a informação (fig. 3.12.d).

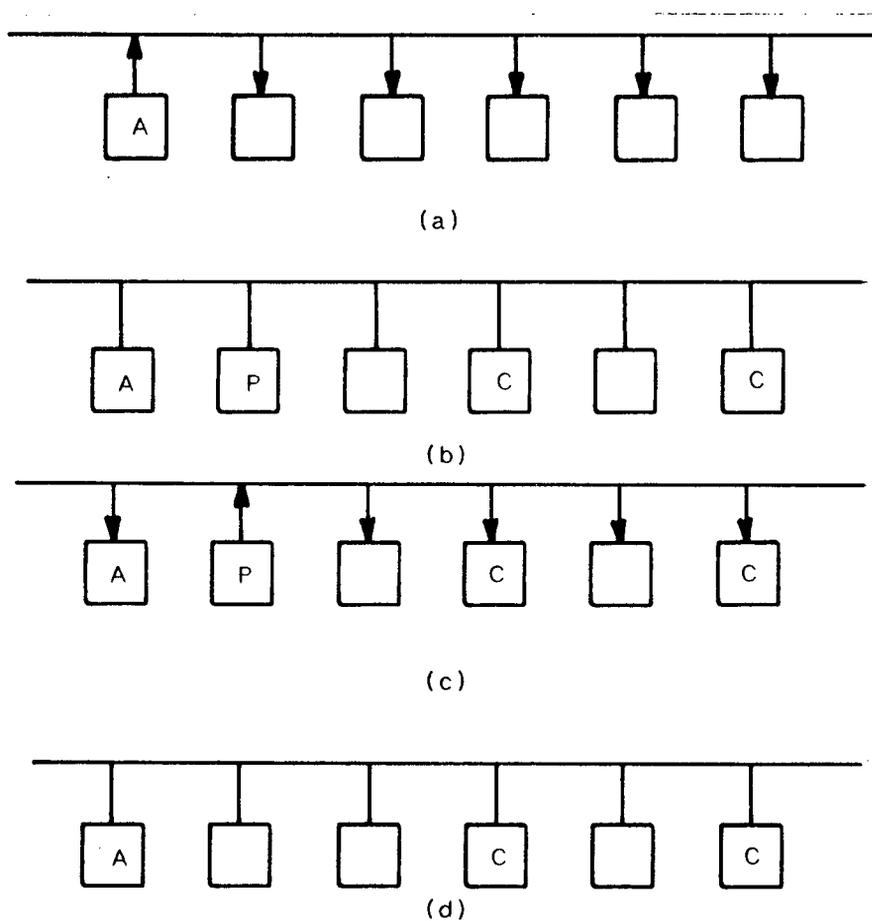


FIGURA 3.12 - Mecanismo de acesso ao meio

A geração do direito de acesso é baseada na varredura de uma lista base de identificadores residente no árbitro, e complementada à partir de requisições dos produtores/consumidores, para os serviços aperiódico e de mensagem, segundo a descrição do item 3.4.2.1.b (fig. 3.1.3.b).

b. Mecanismos de endereçamento:

Os endereços no FIP identificam objetos no barramento, independentemente de sua posição física, e sem identificar as estações em que residem (com exceção do serviço de mensagem), através dos identificadores.

O identificador é um endereço associado a "buffers" (dois ou mais), aos quais podem estar associadas variáveis ou mensagens, no seu produtor e no(s) seu(s) consumidor(es). Um identificador caracteriza um endereço único para todo o FIP e corresponde a um LSAP. A cada identificador pode estar associada uma variável periódica, mas também mensagens e variáveis aperiódicas. A capacidade de endereçamento do FIP é para 2^{16} identificadores, independentemente do número de estações.

No FIP todas as transmissões são por difusão (com exceção do serviço de mensagem com reconhecimento), e as comunicações entre as estações são ponto-a-ponto ou multiponto ("broadcast" ou "multicast"), dependendo da relação das estações com o identificador em transmissão. Todas as comunicações são sem conexão e não há endereçamento de segmentos.

3.4.1.2 Serviços

a. Entidades:

O FIP possui dois tipos de entidades: o árbitro e o produtor/consumidor (fig. 3.13). O árbitro opera como estação primária (iniciadora) e controla o acesso ao meio pelas entidades produtoras de informação.

O produtor/consumidor opera como estação secundária (respondedor) e consiste nas estações associadas aos dispositivos de campo ou aos controladores (entidades usuárias da camada enlace).

b. Descrição detalhada dos serviços:

Os serviços elementares da camada enlace são os seguintes, classificados conforme o fluxo de informação que atende:

- Serviço periódico:

. escrita/leitura de buffer (local) e transferência de "buffer" (TB).

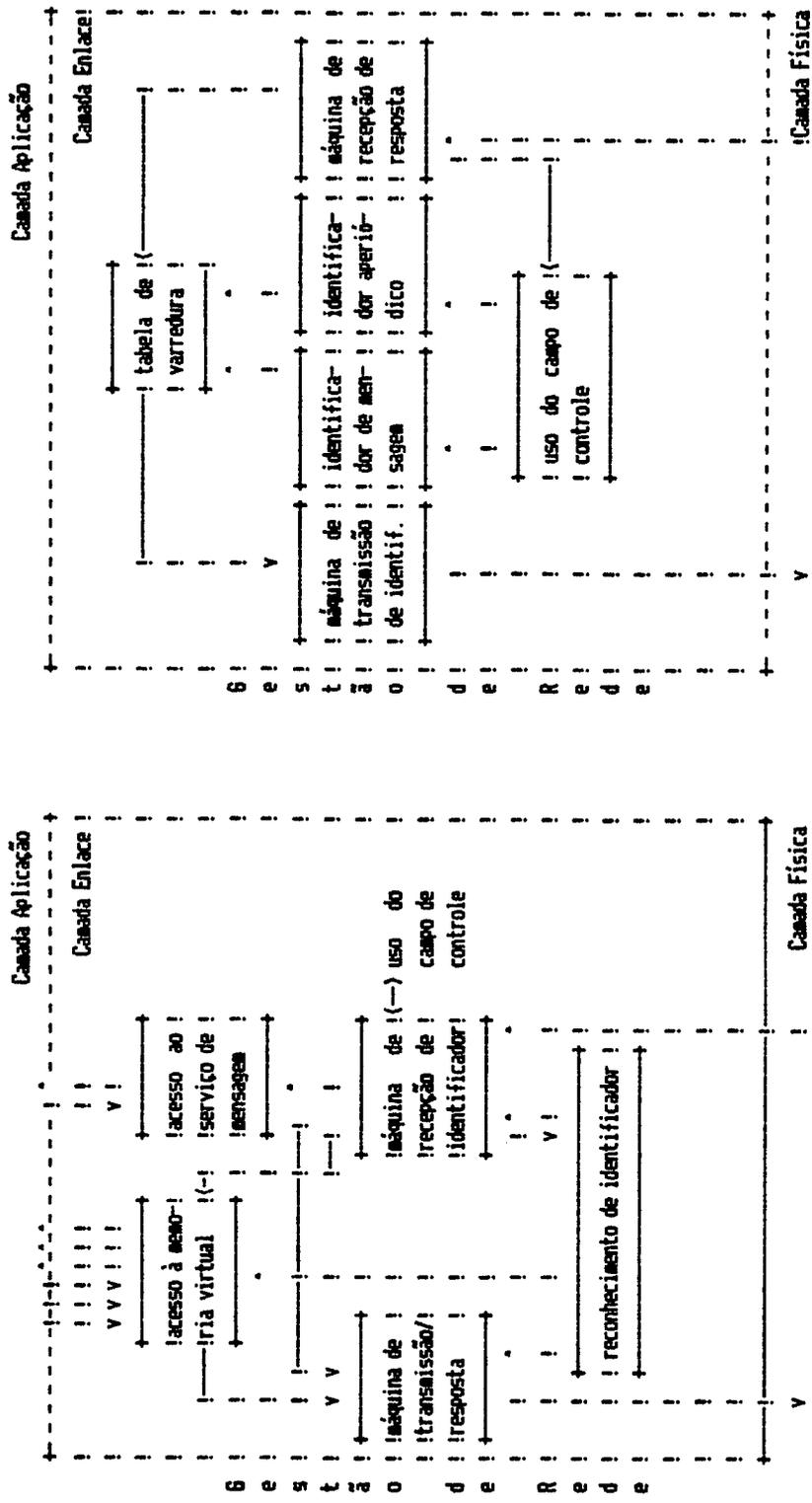
- Serviço aperiódico:

. requisição explícita de transferência de "buffer" (UP).

- Serviço de mensagem:

. requisição de transferência de mensagem sem reconhecimento (SDN);

. requisição de transferência de mensagem com reconhecimento (SDA).



a - produtor/consumidor

b - árbitro

FIGURA 3.13 - FIP - Arquitetura da camada enlace

Na implantação dos 3 fluxos de informação com esses serviços, o árbitro controla a ordem de partilhamento do meio físico entre os mesmos, através do atendimento das solicitações de execução dos serviços aperiódico e de mensagem, em intervalos de tempo determinados (janelas), e através da fixação de uma janela para execução automática do serviço periódico.

A varredura das variáveis periódicas é implementada a partir de uma lista inicializada no árbitro na fase de configuração, que só é alterada em uma reconfiguração.

A ordem de partilhamento do meio físico é baseada no encadeamento de sequências elementares de "frames" no tempo, à partir do mecanismo da figura 3.12, segundo o tipo de serviço a que se referem e respeitando o agrupamento das sequências elementares em janelas. As sequências possíveis são:

- S1: ID_DAT + RP_DAT ou RP_DAT_RQi ou RP_DAT_MSG;
- S2: ID_RQi + RP_RQi;
- S3: ID_MSG + RP_MSG_NOACK;
- S4: ID_MSG + RP_MSG_ACK + RP_ACK.

As janelas consistem em intervalos do tempo alocados para os serviços periódico, aperiódico e de mensagem, cuja composição caracteriza um ciclo elementar (fig. 3.14), que corresponde à maior taxa de interação com o processo sobre controle.

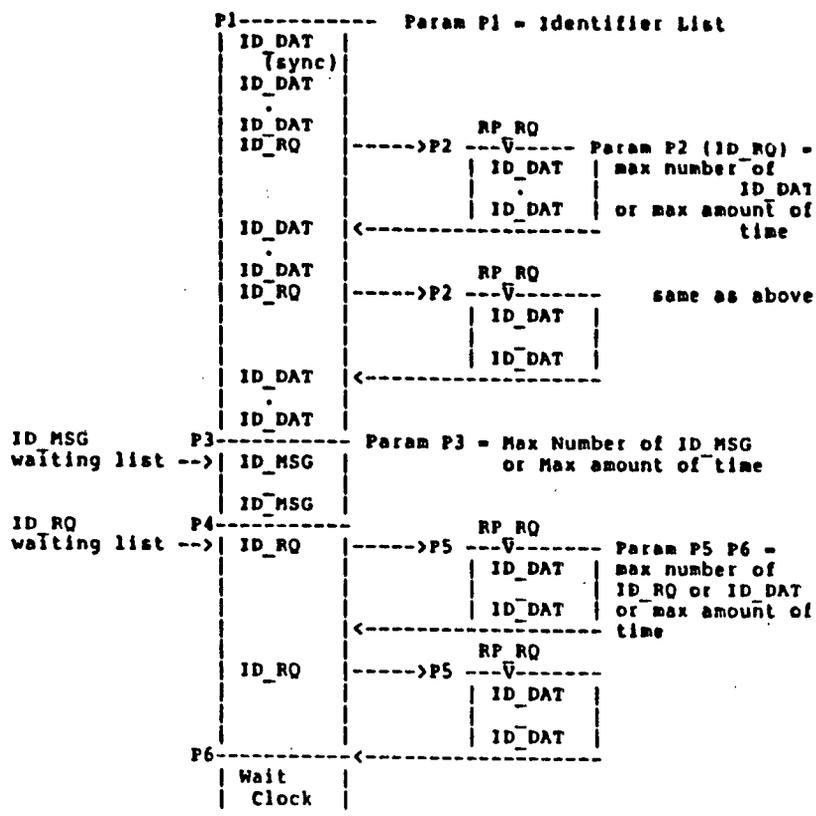


FIGURA 3.14 - FIP - Etapas do ciclo elementar [THOM87]

Um ciclo elementar é composto de 6 etapas, iniciadas pela ação do árbitro (fig.3.12), construídas utilizando-se as sequências elementares acima e executadas na seguinte ordem (fig. 3.14):

- P1: varredura de identificadores relacionados com o serviço periódico, utilizando a sequência S1;
- P2: reexecução da varredura de determinados identificadores do serviço periódico (retransmissões), utilizando as sequências S2 e S1, sucessivamente;

- P3: varredura dos identificadores relacionados com o serviço de mensagens (MN do serviço SDN e MA do serviço SDA), transferidos do produtor para o árbitro no ciclo P1, através de um RP_DAT_MSG (S1), e executados utilizando as sequências S3 ou S4;
- P4: transferência das listas dos identificadores relacionados com o serviço aperiódico do produtor/consumidor para o árbitro, para que o árbitro execute a sua transferência na etapa P5. A solicitação de execução desta etapa ao árbitro é feita na etapa P1, através de um RP_DAT_RQi (S1), e executada utilizando a sequência S2, conforme a prioridade (i);
- P5: varredura dos identificadores da lista de variáveis do serviço aperiódico (de P4), utilizando S1;
- P6: espera pelo sinal de sincronismo, relacionado com o tempo limite de um ciclo elementar.

Um determinado encadeamento dos ciclos elementares, que se repete periodicamente, compõe um macro-ciclo, que corresponde à menor taxa de interação com o processo. Um macro-ciclo pode ser com ou sem sincronização, em função da duração dos ciclos elementares ser fixa ou variável (fig. 3.15), respectivamente.

É importante notar que:

- somente a etapa P1 é mandatória no FIP, sendo todas as demais opcionais;
- nos serviços aperiódico e de mensagem a etapa P1 está sempre presente, na transferência das solicitações do produtor/consumidor para o árbitro;

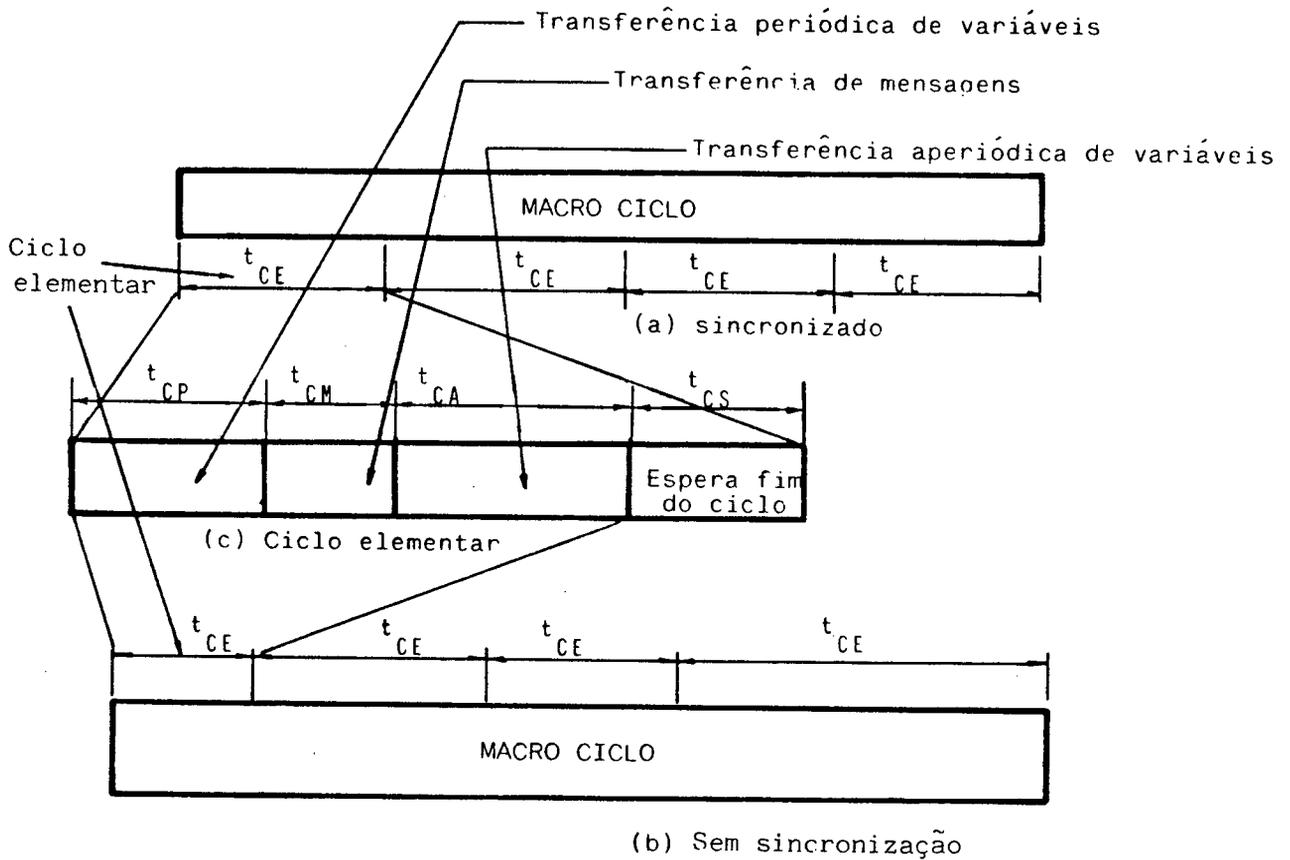


FIGURA 3.15 - FIP - Macro-ciclo

- as etapas P1 e P2 conjugadas (P), caracterizam as operações da janela periódica;
- as etapas P4 e P5 conjugadas (RETB), caracterizam as operações da janela aperiódica;
- o número de transferências aperiódicas/de mensagens por transferência periódica é definido na fase de configuração.

No macro-ciclo sincronizado, o intervalo de tempo de duração de um ciclo elementar, é definido por:

$$t_{CE} = t_{CP} + t_{CA} + t_{CM} + t_{CS},$$

onde:

- t_{CP} : é o intervalo de tempo da janela periódica;
- t_{CA} : é o intervalo de tempo da janela aperiódica;
- t_{CM} : é o intervalo de tempo da janela de mensagens;

- t_{ca} : é o intervalo de tempo do ciclo de sincronização, presente somente no macro-ciclo sincronizado (etapa P6).

Uma descrição das funções e operações associadas a cada serviço é apresentada a seguir.

b.1 Escrita/Leitura de "buffer" (figura 3.16.a):

Os serviços de Escrita/Leitura permitem ao usuário escrever/ler na camada enlace o conteúdo de um "buffer" local, associado a uma variável identificada.

b.2 Transferência de "Buffer" (TB):

Permite a transferência de uma variável identificada, por iniciativa do árbitro, sem necessidade de uma solicitação de um usuário. O serviço TB é um serviço elementar da janela periódica.

Os usuários produtor e consumidor são somente informados da conclusão da transferência, através das primitivas de serviço, podendo ler/atualizar essas variáveis com os serviços descritos no item anterior. A sequência de interações associada a execução do serviço é apresentada na figura 3.16.a.

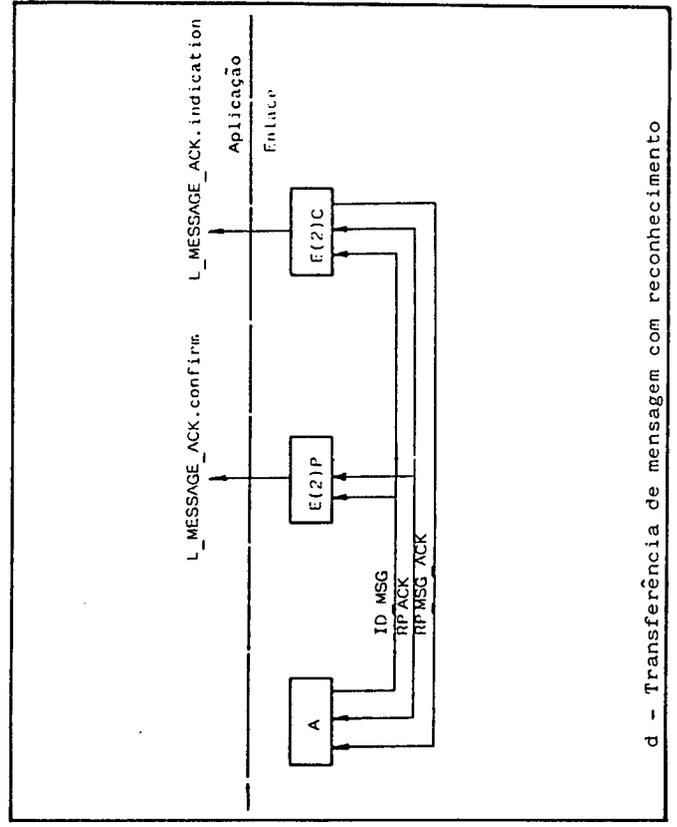
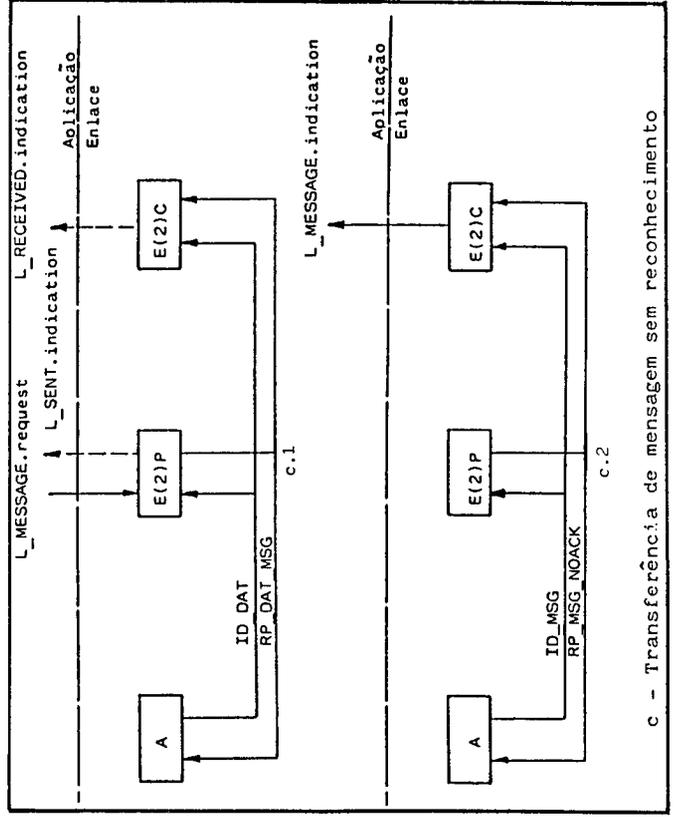
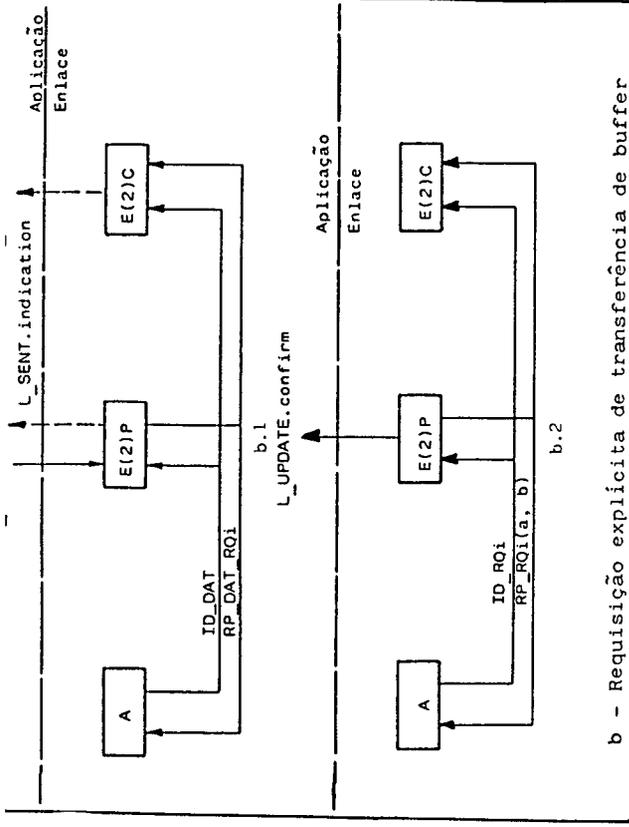
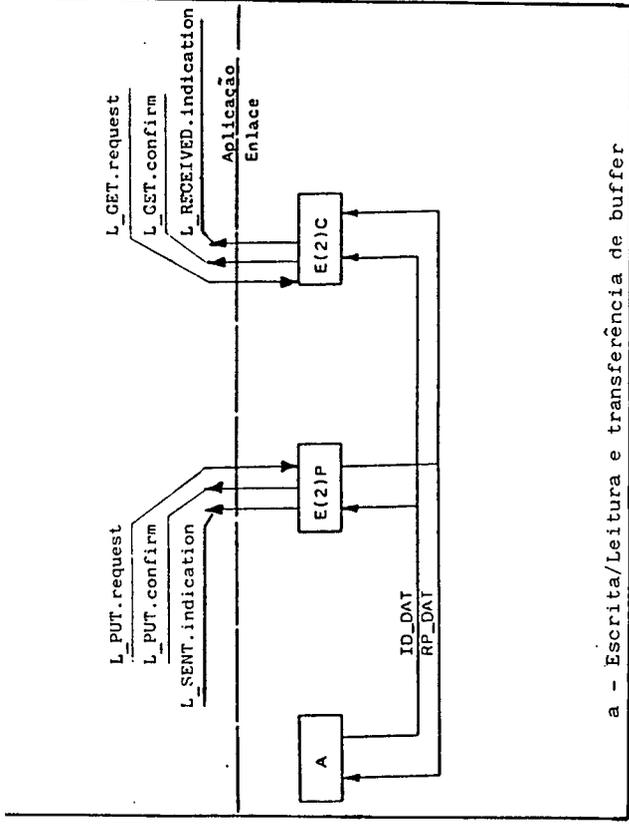


FIGURA 3.16 - FIP - Serviços da camada enlace

b.3 Requisição explícita de transferência de "buffer" (serviço aperiódico - UP):

Permite ao usuário solicitar à entidade árbitro a execução dos serviços TB, para uma lista de variáveis determinada. A nível da camada enlace, a solicitação de transmissão da lista de variáveis é transferida do produtor/consumidor para o árbitro na janela periódica e é executada durante a janela aperiódica, de acordo com dois níveis de prioridade (urgente ou normal).

A sequência de interações associada à execução do serviço como um todo (UP) consiste na sua solicitação ao árbitro em um serviço TB (fig. 3.16.b.1) e na sua efetiva execução (RETB) em 2 etapas: transferência da lista de identificadores (IDRQ - fig.3.16.b.2) e efetiva transferência dos identificadores (TB - fig.3.16.a).

b.4 Requisição de transferência de mensagens sem reconhecimento (SDN):

Permite ao usuário (entidade produtora) solicitar a execução de uma operação de transferência de mensagem, sem indicação de recebimento pela entidade consumidora. A nível da camada enlace, a solicitação é feita durante a janela periódica e atendida na janela de mensagem, similarmente ao serviço UP.

A sequência de interações associada à execução do serviço completo (SDN) é indicada na figura 3.16.c, nas suas fases de

transferência da requisição do produtor para o árbitro (TB - fig. 3.16.c.1) e de efetiva execução (MN - fig. 3.16.c.2).

b.5 Requisição de transferência de mensagem com reconhecimento (SDA):

Permite ao usuário (entidade produtora) solicitar a execução de uma operação de transferência de mensagem, com indicação de recebimento pela entidade consumidora. A nível da camada enlace, a solicitação é feita na janela periódica e atendida na janela de mensagens, similarmente ao serviço UP.

A sequência de interações, associada à execução do serviço completo (SDN), é apresentada nas figuras 3.16.c e 3.16.d, nas suas fases de transferência da requisição do produtor para o árbitro (TB - fig. 3.16.c.1) e de efetiva execução (MA - fig. 3.16.d).

c. Prioridades:

Existem dois níveis de prioridade, associados somente ao serviço aperiódico: urgente ou normal. Não existem prioridades relativas entre os diferentes tipos de serviços.

d. "Frames" (PDU's):

O formato de um "frame" completo no FIP é apresentado na figura 3.17, cuja unidade elementar de informação é a palavra

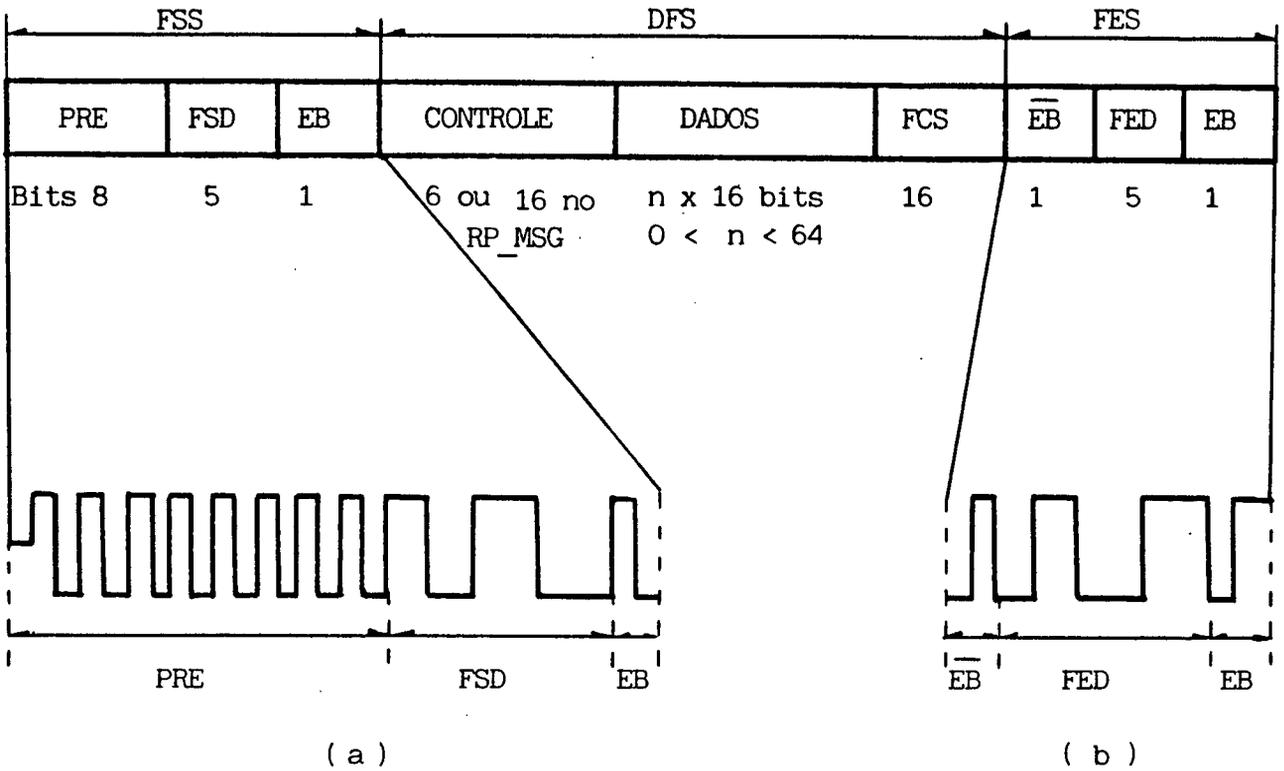


FIGURA 3.17 - FIP - Formato do "frame"

de 16 bit, sem bits de controle. Os tipos de "frames" do FIP são apresentados na figura 3.18, com as siglas dos "frames" referidas às sequências elementares do item "b".

3.4.1.3 Controle de erros

O controle de erros no FIP é feito a nível de "frame" (16 bit de CRC) e alcança uma distância de Hamming de 4.

No árbitro e no produtor o controle de perda de um "frame" é feito através dos "time-outs", mas sem a retransmissão de "frames" incorretos (com excessão do serviço SDA).

| Tipo de "frame" | Campo de Controle | Campo de Dados |
|-----------------|-------------------|--|
| Identificador | I ID_DAT | I identificador da variavel (16 bit) |
| | I ID_MSG | I |
| | I ID_ROI | I |
| | I ID_RO2 | I |
| Resposta | I RP_DAT | I |
| | I RP_DAT_MSG | I valor de variavel (Nx 16 bit, com |
| | I RP_DAT_ROI | I 0 (N (64) |
| | I RP_MSG_ACK | I |
| | I RP_MSG_NDACK | I |
| | I RP_ACK | I "acknowledgement" (16 bit) |
| | I RP_ROI | I lista dos identificadores das varia- |
| | I | I veis (Nx 16 bit) |
| | I | I |
| | I | I |

Legenda:

ID: frame identificador
 RP: frame resposta
 DAT: variavel identificada
 MSG: mensagem
 ROI: requisição explicita de transferencia variavel identificada
 ACK: com reconhecimento
 NDACK: sem reconhecimento

FIGURA 3.18 - FIP - Tipos de "frames"

Erros detetados pelo transmissor são tratados em função do tipo de serviço, como segue:

- serviço periódico: é atualizado no ciclo seguinte ou tratado a nível da camada aplicação, com eventual retransmissão no serviço aperiódico.
- serviço aperiódico e de mensagem (SDN): é tratado a nível da camada aplicação.
- serviço de mensagem (SDA): informado através de "indication" à camada aplicação, após expirado o número máximo de retransmissões.

Os erros de duplicação não têm significado no serviço periódico; são detetados a nível da camada aplicação no serviço aperiódico; e evitados através da numeração par/ímpar e da restrição de controle de fluxo no serviço de mensagem.

3.4.2 Análise temporal

Similarmente ao PROFIBUS, neste item serão caracterizados e definidos os tempos internos e sistêmicos associados aos serviços do FIP, em seus valores e na sua aplicação em cada serviço, na obtenção dos tempos de usuário, segundo o modelo da figura 3.4.

3.4.2.1 Tempos do usuário

a. Tempo do serviço (t_{e}):

Como o controle do início da execução dos serviços no FIP se dá à partir do árbitro (fig. 3.12), não é possível obter-se Q_u à partir de t_{RC} , pois sempre haverá uma defasagem entre a ocorrência de uma primitiva "request" e o início da execução do serviço.

Adicionalmente, a primitiva "confirm" no serviço aperiódico não indica a conclusão da transferência das informações aperiódicas, mas somente a transferência da lista dos seus identificadores do produtor/consumidor para o árbitro. Neste contexto, t_{e} será considerado como tempo de usuário na obtenção de Q_u .

Um serviço no FIP pode envolver transmissões por parte do árbitro, do produtor e, em alguns casos, do consumidor ("frame" tracejado - fig. 3.4), que determinam o valor final de t_{e} .

- árbitro e produtor:

$$t_{\text{e1}} = t_{\text{SDR}} + t_{\text{TX}} + t_{\text{SDF}} + t_{\text{RX1}}$$

- árbitro, produtor e consumidor:

$$t_{\text{e2}} = t_{\text{SDR}} + t_{\text{TX}} + t_{\text{SDF}} + t_{\text{RX1}} + t_{\text{SDC}} + t_{\text{RX2}}$$

- serviço em duas fases (aperiódico e de mensagem):

$$t_{BS} = t_{B1} + t_{ET} + t_{BE}$$

sendo:

$$t_{TX} = t_{TF} + t_{TD} = t_{ID_DAT} + t_{AP}$$

$$t_{RX1} = t_{TF1} + t_{TD1} = t_{RP_DAT} + t_{PC}$$

$$t_{RX2} = t_{TF2} + t_{TDE} = t_{RP_ACK} + t_{CA}$$

b. Tempo entre as primitivas "request" e "confirm/indication" (t_{RC} e t_{RI}):

t_{RC} e t_{RI} variam em função do serviço, não possuindo uma representação por relações diretas, só existindo para os serviços aperiódico e de mensagem. Seus valores dependem do instante da geração da primitiva "request", relativamente ao estágio de execução do ciclo elementar pelo árbitro (defasagem).

c. Tempo de execução do serviço periódico (t_P):

$$t_P = \sum_{i=1}^{n_P} t_{TBI}$$

onde t_{TBI} é o tempo de um serviço elementar TB

d. Tempo entre execuções do serviço periódico (t_{BR}):

$$t_{BR} = t_{CE}$$

e. Tempo de acesso ao barramento (t_{AB}):

Em face às considerações tecidas anteriormente em relação a t_B , t_{AB} não apresenta uma equação única para a sua

caracterização, variando com o serviço e a condição de interesse. A seguir serão definidos valores máximos e mínimos para t_{AB} para cada serviço, sobre condições determinadas.

e.1 serviço periódico de transferência de "buffer":

t_{AB} pode variar de

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{ABmin} = t_{PR} \text{ !} \\ \text{!-----!}, \end{array}$$

que indica que a escrita no "buffer" a ser transferido deve ocorrer pelo menos t_{PR} antes de concluída a recepção do "frame" ID_DAT associado, até o valor máximo de:

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{ABmax} = t_{PR} + t_{CE} \text{ !} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

e.2 serviço aperiódico:

t_{AB} pode variar de:

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{ABmin} = t_{PR} + t_{E1} + t_{CM} \text{ !} \\ \text{!-----!}, \end{array}$$

onde a solicitação do produtor/consumidor é:

- gerada e em seguida é transferida para o árbitro (RP_DAT_RQi), na última transação TB da janela periódica;
- a primeira a ser executada na janela aperiódica;

até o valor máximo de:

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{ABmax} = t_{PR} + r.t_{CE} + m.t_{OE} + t_{CM} + t_{CA} \text{ !} \\ \text{!-----!}, \end{array}$$

considerando que a solicitação espera:

- $t_{PR} + r.t_{CE}$ para ser transferida para o árbitro;
- $m.t_{CE} + t_{CM} + t_{CA}$ (t_{ET} da figura 3.4) para ser executada, sendo ainda, a última a ser executada na janela aperiódica.

onde "r" e "m" ($\in \mathbb{N}^+$) dependem do nível de ocupação das filas de transmissão e do estado do árbitro, relativamente ao instante da solicitação.

c.3 serviço de mensagem:

t_{AB} pode variar de:

$$\boxed{t_{ABmin} = t_{PR} + t_{B1}}$$

até o valor máximo de:

$$\boxed{t_{ABmax} = t_{PR} + r.t_{CE} + m.t_{CE} + t_{CM}}$$

sendo análogas as considerações tecidas para o serviço aperiódico.

3.4.2.2 Tempos internos (determinantes dos tempos do usuário)

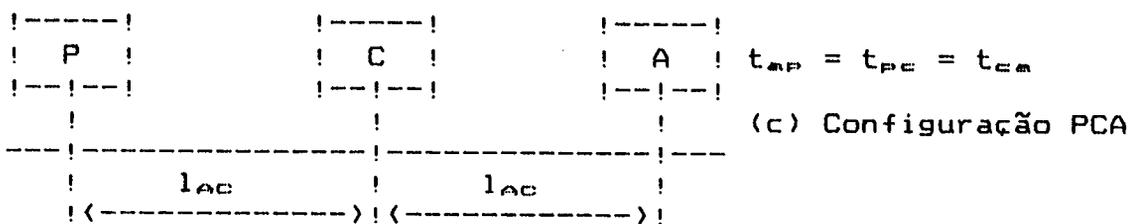
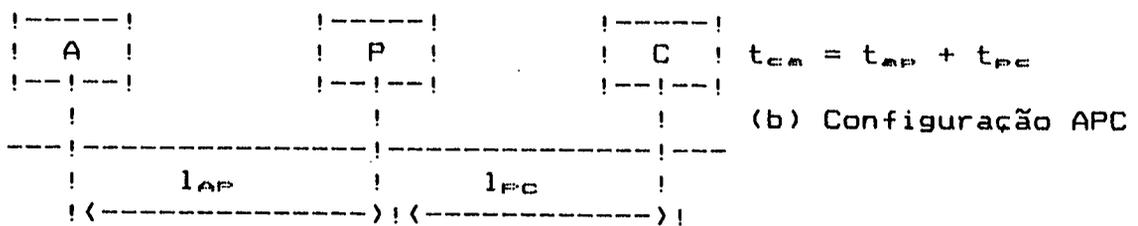
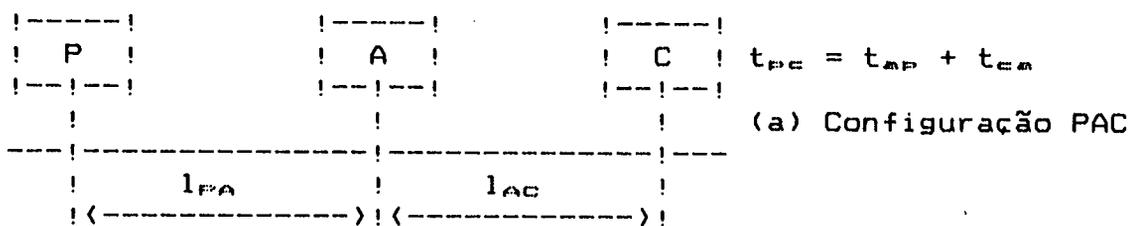
a. Definição:

a.1 t_{DPR} , t_{DPP} , t_{DPC} , t_{TX} , t_{RX1} e t_{RX2} estão definidos no item 3.2.

a.2 t_{AP} , t_{PE} , t_{EM} :

As siglas ap , pc e ca são uma notação adotada especificamente para o FIP, para o atraso de propagação do

sinal (TD) entre duas estações comunicantes (t_{TD}), decorrentes da sua característica básica, que é o envolvimento de 3 entidades na execução de um serviço. Conforme indicado na figura 3.19, estas entidades podem assumir 3 configurações, em termos de suas posições relativas ao longo do comprimento total do barramento, com os seus valores t_{AP} , t_{PC} e t_{CA} variando de 0 a t_{TDmax} , conforme a posição das estações.



$$t_{TD} \rightarrow 1, l_{AC}=l_{CA}, l_{PC}=l_{CP}, l_{AP}=l_{PA}$$

FIGURA 3.19 - FIP - Distribuição das entidades no meio físico

a.3 "Time-outs" (t_0 , t_1 , t_E):

Os "time-outs" t_0 e t_1 são as temporizações de máxima espera no:

- árbitro (t_0), por um "frame" resposta, após transmitir um "frame" identificador;

- consumidor (t_1), por um "frame" resposta, após receber um "frame" identificador para o qual é consumidor;
- produtor (t_1), por um "frame" RP_ACK, após transmitir um "frame" resposta.

A temporização t_0 mede o máximo tempo de ociosidade do barramento, à partir do qual assume-se que há uma falha no árbitro, sendo automaticamente ativado o árbitro "back-up".

Na definição das temporizações t_0 e t_1 (fig. 3.20),

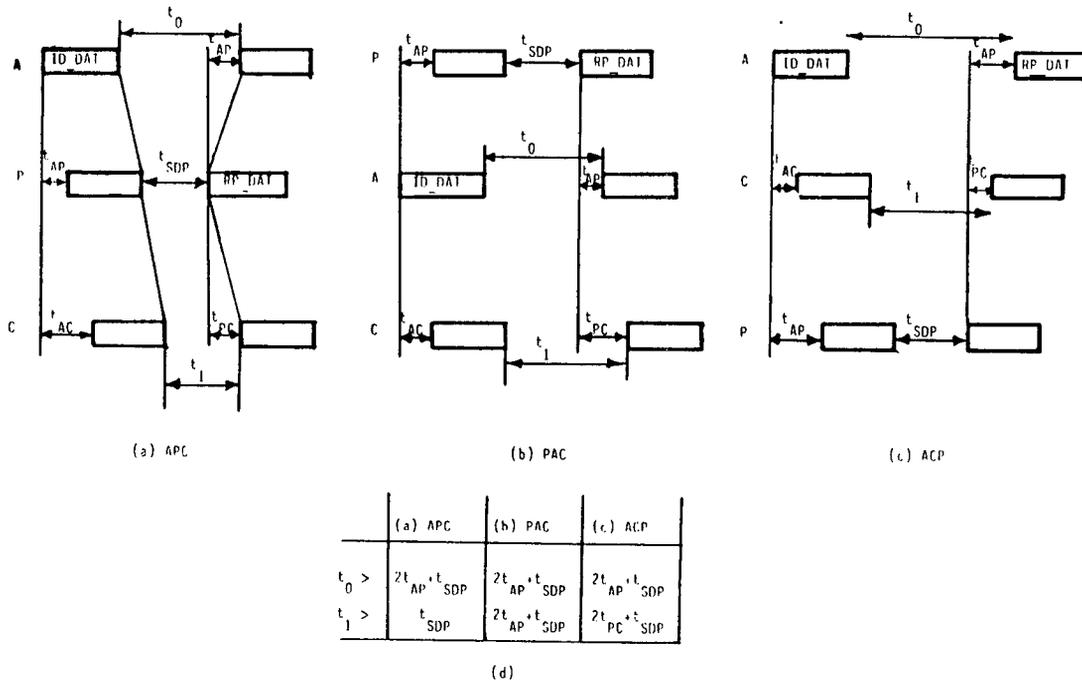


FIGURA 3.20 - FIP - "Time-outs" t_0 e t_1

considerou-se:

- o início de um "frame" resposta, para efeito de desarme do "time-out", no início da transmissão do campo PRE do mesmo;
- as configurações indicadas na figura 3.19.

Nas configurações da figura 3.20, para um cabo de comprimento máximo "l", produzindo um atraso total de propagação t_{TP} , o pior caso na tabela (fig. 3.20.d) ocorre quando as estações terminais estão na extremidade do cabo. Para que os tempos sejam definidos independentemente da posição relativa entre as estações A, P e C, as seguintes inequações devem ser observadas [AGUI489]:

$$t_0 > 2.t_{TP} + t_{DP}$$

$$t_1 > 2.t_{TP} + t_{DP}$$

$$t_1 < t_0$$

Além desses "time-outs", são especificados três outros a nível da entidade solicitante nos serviços aperiódico e de mensagem [THOM287], definidos como t_3 , t_4 , e t_5 , que medem o tempo máximo entre o término da transferência de uma solicitação de execução dos serviços aperiódico e de mensagem sem e com reconhecimento, respectivamente, até o início da sua execução nas janelas aperiódica e de mensagem. Estes "time-outs" não serão estudados no presente trabalho, sendo somente representados no Anexo 7.1, por estar sendo discutida a sua retirada das especificações do FIP [TELE--] e por não contribuírem para o estudo de desempenho.

a.4 t_{ET} :

t_{ET} mede o tempo entre duas fases de um serviço do FIP. Usualmente, entre as fases de transferência da solicitação do

produtor/consumidor para o árbitro e a efetiva execução do serviço. É dependente de condições dinâmicas, tendo sido considerado na descrição de t_{AR} , para condições limites.

b. Valores:

Quanto a definição dos valores desses tempos, somente t_{TF} e t_{RF} são especificados no FIP, que não estabelece distintas implementações de estações para H1 e H2 e não fornece os tempos dependentes das implementações das estações (t_{SDA} , t_{SDF} , t_{SDC} e, em decorrência: t_0 e t_1), como no PROFIBUS.

As únicas informações obtidas das especificações [TELE--] [THOM187] [FIP89] são indicações de desempenho. Tomando-se como referência estas indicações, obtém-se os seguintes valores para os tempos do FIP:

$$t_m = 35 \text{ us [THOM187]}$$

Assumindo-se 10 % como a diferença máxima entre os "time-outs" nas inequações que os relacionam (item "a.3"), para prever erros de contagem em estações distintas, tem-se:

$$t_0 = 0,9.t_m = 31,5 \text{ us}$$

$$t_1 = 0,9.t_0 = 28,4 \text{ us}$$

Para uma margem de segurança também de 10 % para t_1 , em relação aos tempos internos, dependentes da implementação das entidades, teremos:

$$0,9.t_1 = 2.t_{TD} + t_{SDPmax} \Rightarrow t_{SDPmax} = 15,5 \text{ us}$$

para o máximo alcance de 1 km a $f = 1 \text{ Mbps}$

Como estas indicações de desempenho foram obtidas em condições máximas de alcance e, considerando as diferenças de

resultados observadas nas indicações de distintas especificações, pode-se assumir que:

$$t_{\text{EDPmin}} = 12,3 \text{ us}$$

Assim, o intervalo possível de variação para t_{EDP} será:

$$t_{\text{EDP}} = [12,3; 15,5] \text{ us a } f = 1 \text{ Mbps, para o produtor.}$$

Assumindo-se que esses tempos de reação são idênticos para diferentes entidades, teremos:

$$t_{\text{EDPr}} = [12,3; 15,5] \text{ us, para o árbitro,}$$

$$t_{\text{EDPc}} = [12,3; 15,5] \text{ us, para o consumidor,}$$

que são valores intermediários de tempo de reação, entre os especificados no PROFIBUS e o 1553B [BURT88].

3.4.2.3 Análise dos serviços

Similarmente ao PROFIBUS, aplicou-se o modelo da figura 3.4, a cada serviço da camada enlace e, em decorrência, obteve-se uma descrição matemática dos tempos do usuário, conforme o equacionamento do item 3.4.2.1. A descrição detalhada destes resultados é apresentada no Anexo 7.1.

3.4.2.4 Controle de ocupação do barramento

O controle de ocupação do barramento na execução dos serviços periódico, aperiódico e de mensagem é baseado nos ciclos elementares e macro-ciclos, conforme descrito no item 3.4.1.2.b.

3.5 ANÁLISE PRELIMINAR

A aplicação da metodologia descrita no item 3.2 sobre as especificações de camada enlace do FIP e PROFIBUS permitiu o levantamento: dos elementos e operações internas, envolvidos na implementação dos seus serviços; dos tempos observáveis pelos seus usuários e as suas relações com os tempos internos e sistêmicos.

Como resultado desta aplicação, foi possível parametrizar as características e elementos operacionais e temporais, envolvidos no desempenho da camada enlace, e levantar a forma de implementação desses elementos, adotada por cada proposta. Este levantamento, decorrente da análise operacional e temporal, consistiu numa revisão das especificações de cada proposta [AGUI189] [AGUI289] [AGUI489] e na identificação das informações necessárias para o desenvolvimento dos modelos em Redes de Petri Predicado-Ação e Temporizadas.

Adicionalmente, um conjunto de indefinições nas especificações das propostas foi identificado, sendo apresentado a seguir.

3.5.1 Restrições e Indefinições

As descrições do PROFIBUS e do FIP, bem como as informações de desempenho utilizadas no Capítulo 4, estão baseadas nas referências indicadas no Capítulo 6. Apesar de constituírem especificações detalhadas, algumas informações necessárias para o estudo de desempenho não são definidas.

A seguir são apresentadas as considerações em torno das principais indefinições (opções adotadas e hipóteses assumidas), para efeito do presente estudo.

3.5.1.1 PROFIBUS

- a. Nos serviços SRD e CSRD, assumiu-se que os LSAP's, são "buffers full-duplex", bidirecionais com tamanho 2 em cada direção, para proteger a informação contra sobre-escrita e para manutenção do valor anterior, na implantação do protocolo de controle de erro de duplicação (ver item "c").
- b. Na execução de determinada transação do serviço CSRD, caso não tenha havido atualização no SSAP local (L_UPDATE.request), assumiu-se que é transmitido o valor anteriormente armazenado no SSAP, para que o serviço não seja atrasado nem suspenso.
- c. No atendimento das requisições dos serviços pelos usuários da camada enlace e nas operações simultâneas com LSAP's distintos, assumiu-se que o número de requisições simultâneas não é limitado e que o paralelismo entre as operações é pleno.
- d. No que concerne ao número de tentativas de retransmissões para a transferência do "token", assumiu-se que todas as estações da LMS são tratadas identicamente pela estação local (mesmo número de retransmissões - n_r), mesmo

- quando a transferência para a NS (fig. 3.6) é mal sucedida.
- e. Na definição das temporizações internas do PROFIBUS, os fatores que compõem o tempo t_{BL} , tais como t_{EM} , foram estimados e as demais temporizações foram agrupadas em duas categorias, conforme as considerações do item 3.3.2.2 [AGUI489].
- f. Após a transmissão do "frame" de transferência do "token", a estação TS espera (t_{BL}) a ocorrência de uma ação da NS. A espera pode terminar com a recepção de um "frame" íntegro [SIEM88] ou com o desarme de t_{BL} (recepção do primeiro caracter - t_{OAR}). Para manter coerência com as definições de temporizações (item 3.3.2.2), será considerado o desarme de t_{BL} , à partir da iniciativa de transmissão da estação NS, como condição suficiente para o sucesso da transferência, mesmo que a estação TS não receba um "frame" íntegro. Caso não se adotasse esta opção [SIEM88], a estação TS poderia interferir indevidamente nas transações em execução pela estação NS.
- g. Numa configuração multi-mestre/multi-controlador, assumiu-se que haverá uma divisão equalitária do uso do barramento entre os mestres (t_{TH} iguais), ao invés de uma divisão em função da demanda de serviços em cada mestre.

h. Nos serviços CRDR e CSRD, a política de execução da Poll_list após uma interrupção da execução por expiração de t_{TH} , pode implicar em: continuar a varredura da Poll_list de onde parou ou reiniciar a execução do topo da lista. Para efeito do estudo de desempenho, adotou-se a primeira condição.

3.5.1.2 FIP

a. Na definição dos valores assumidos pelos seguintes tempos internos e sistêmicos:

- tempos de reação (máximo e mínimo) do árbitro (t_{SDAR}), produtor (t_{SDP}) e consumidor (t_{SDC});
- "time-outs" para o "idle-time", árbitro e produtor/consumidor (t_m , t_0 e t_1);

utilizou-se as indicações de desempenho, obtidas das especificações [TELE--] [THOM187] [FIP89], conforme a descrição do item 3.4.2.2.b.

b. Assumiu-se que os "time-outs" de máxima espera pela recepção de um "confirm", após geração de um "request" nos serviços aperiódico e de mensagem, não fazem parte das especificações do FIP [TELE--].

c. Assumiu-se que os "time-outs" de espera por um "frame" resposta (t_0 e t_1) são desarmados no início da transmissão do campo PRE e, em decorrência, o tempo de transmissão do campo de sincronização PRE (t_{PRE}) de um "frame" não está incluído no tempo de reação da entidade

que o transmite (no PROFIBUS $t_{BYN} = t_{PRE} + t_{ID}$ inclui t_{BYN}).

- d. Quanto à forma de gerenciamento da execução dos serviços aperiódico e de mensagem pelo árbitro, assumiu-se que os serviços cuja execução foi mal-sucedida serão re-executados e que os serviços que não puderam ser executados em um dado ciclo elementar serão mantidos nas filas, até a sua execução nos ciclos elementares seguintes.
- e. Em função da não existência de uma primitiva "confirm" para o serviço SDN, não é assegurado (nem mesmo) o sucesso local do serviço. Desde que há uma fila de mensagem única, uma requisição SDN pode destruir uma requisição SDA anterior, caso não haja espaço na fila de mensagem. Em função desta limitação, assumiu-se que as filas de transmissão para mensagens são todas separadas e que são executados primeiramente os serviços SDA, na janela de mensagem.
- f. Assumiu-se que, em um macro-ciclo sem sincronização, não há limitação do tamanho das janelas aperiódica e de mensagem e no macro-ciclo sincronizado a limitação é feita por uma temporização interna ao árbitro e não pelo número máximo de serviços na janela [THOM287] (que não asseguraria limitação temporal).

- g. Nas características de interesse indefinidas no serviço SDA, assumiu-se as seguintes condições:
- máximo uma retransmissão ($n_r=1$), para efeito de comparação com o PROFIBUS. Adicionalmente, um estudo de valores possível para n_r será desenvolvido;
 - não haverá o truncamento da execução de sucessivas retransmissões do serviço, caso a sua execução ultrapasse o tempo limite estabelecido para a janela de mensagem;
 - as considerações do Anexo 7.1, quanto à problemática de inconsistência entre o produtor e o árbitro nos resultados do serviço, devido à perda do RP_ACK.
- h. Caso a temporização que limita o tamanho máximo de uma janela aperiódica expire em meio à execução do serviço aperiódico, assumiu-se que a mesma não é interrompida. Com isso, podem ocorrer variações grandes na dimensão da janela aperiódica, em função do tamanho da lista de variáveis (nIDA).
- i. Assumiu-se que a prioridade no serviço aperiódico define a organização das filas no árbitro, mas não interfere na ordem de transferência da solicitação do serviço do produtor/consumidor para o árbitro.

3.5.2 Focalização do estudo de desempenho

3.5.2.1 Análise dos resultados

Na análise operacional, definiu-se todas as características e operações internas da camada enlace de cada proposta. O resultado da análise operacional consiste na descrição das características e do comportamento interno a cada entidade e da camada enlace como um todo, na execução dos serviços que a camada fornece.

Na análise temporal, estabeleceu-se os tempos internos e sistêmicos associados à análise operacional, bem como a sua forma de interferência no desempenho de cada proposta, observável através dos tempos de usuário. O resultado da análise temporal é uma tentativa de se estabelecer relações matemáticas que determinem todos os tempos de usuário em função dos tempos internos, para cada serviço individual.

Assim, se estes resultados forem aplicados diretamente, ter-se-á uma análise inicial do desempenho de cada proposta. Contudo, na definição dos valores das variáveis dessas equações, por exemplo, a sua grande maioria teria que ser estimada ou atribuída "a priori". Além disso, o valor resultante da aplicação destas relações caracterizaria apenas uma "fotografia" da mesma para uma determinada condição, pois mesmo os tempos internos (tais como: t_{MDI} , t_{TD} , t_{ID}) variam dentro de um determinado intervalo. Adicionalmente, as relações matemáticas para t_{AR} , t_{BR} e t_P evidenciam ainda mais esta problemática, pelo fato de dependerem de condições dinâmicas e, algumas vezes aleatórias do comportamento do

"field-bus" (concorrência com outros serviços - t_{ER} e t_{ET} , rotação do "token" t_{RR} , etc.). Com isso, a análise resultante caracteriza uma avaliação estática da camada enlace.

3.5.2.2 Análise dinâmica de desempenho

Na fixação das condições de análise de desempenho, para uma avaliação dinâmica da camada enlace, será necessário combinar a descrição operacional com a descrição temporal, considerando o comportamento dinâmico de ambas. Definiu-se para esta avaliação dinâmica duas categorias de modelos: individuais e combinados.

Os modelos individuais consistem em representações dos serviços elementares (fig. 3.1), tais como SDA, RDR e SRD no PROFIBUS e TB, RETB/UP e MA/SDA no FIP, nos quais se avaliará:

- t_B (ou t_{RO} com $t_{OB} = 0$ - PROFIBUS) para obtenção de Q_u , e de $E\%$;
- o número de execuções dos serviços mal-sucedidos em relação ao total, para obtenção das perdas finais (P_f) em função ds perdas físicas (P_p) e do número de retransmissões do serviço (n_r).

Os modelos combinados são combinações dos modelos individuais dos serviços CRDR, CSRD, SDA, RDR e SRD e da transferência do "token" no PROFIBUS; e dos serviços TB, UP/RETB, SDA/MA, SDN/MN no FIP, utilizados na avaliação dos tempos t_{OB} , t_{OR} e t_p , dentre outros, determinantes da qualidade dos serviços periódico, aperiódico e de mensagem.

3.5.2.3 Análise de implicações sobre o modelo de desempenho

A aplicação do modelo da figura 3.1, do qual decorrem as análises operacional e temporal, permitiu um levantamento abrangente da estratégia de implementação do referido modelo, adotada por cada proposta.

Neste contexto, o estudo desenvolvido, além de analisar o desempenho dessas implementações, permitirá o estabelecimento de um paralelo entre duas filosofias de implementação de camada enlace, para características tais como:

- a forma de definição dos fluxos de informação: sistêmica (FIP) ou individualizada por controlador (PROFIBUS);
- a estratégia de distribuição da ocupação da camada enlace: fixa, com intervalos alocados para cada serviço (janelas - FIP), ou livre, definida pela diferença de prioridade entre classes de serviços (PROFI-BUS);
- a estratégia de definição (configuração das variáveis e ativação) do serviço periódico: sistêmica e uma única vez (FIP), individualizada por controlador e com possibilidade de redefinição a cada execução do serviço;
- o mecanismo de resolução de prioridade, quanto:
 - . a sua abrangência: sistêmica, para todo o "field-bus" (FIP) ou a nível de cada controlador (PROFIBUS);
 - . ao seu âmbito de ação: em uma dada classe de serviços (FIP) ou também entre serviços (PROFIBUS).

- a associação dos serviços elementares com as classes de serviços: fixa (FIP) ou livre, com opções de serviços elementares para cada classe de serviço (com ou sem reconhecimento, alta ou baixa prioridades, leitura ou escrita - PROFIBUS).

3.6 CONCLUSÃO

Neste Capítulo se estabeleceu os critérios e a metodologia a ser adotada na análise de desempenho; a relação dos critérios de desempenho com os tempos mensuráveis pelo usuário da camada enlace e a dependência desses tempos em relação as características operacionais e temporais, internas à camada, e a forma de obtenção dos elementos de desempenho, à partir da definição de modelos individuais e combinados para os serviços.

A aplicação da metodologia adotada permitiu, partindo-se das especificações das propostas FIP e PROFIBUS (ítems 6.1.2.2 e 6.1.2.1, respectivamente), desenvolver-se uma descrição geral dos elementos e serviços das suas camadas enlace, até o nível dos seus detalhes temporais e operacionais de implementação.

Este estudo foi útil no entendimento abrangente de todas as implicações e restrições das implementações dos serviços de cada proposta, que tornou possível:

- traçar um paralelo entre as características de interesse para o estudo de desempenho do FIP e do PROFIBUS, com o intuito de balizar a execução da modelagem dos serviços de forma estruturada;

- entender em profundidade os compromissos e restrições operacionais e temporais da camada enlace;
- desenvolver um levantamento sistemático dos detalhes de implementação nas especificações das propostas;
- focalizar o estudo de desempenho a ser desenvolvido.

Este resultado servirá de base para o desenvolvimento de modelos combinados e individuais dos serviços da camada enlace, à partir da descrição do comportamento do serviço (análise operacional) e dos tempos associados (análise temporal).

Uma descrição da forma de desenvolvimento dos modelos, à partir dessas informações e das condições de execução dos mesmos, na avaliação dos diversos elementos de desempenho, será apresentada no Capítulo 4.

O resultado fundamental do desenvolvimento deste Capítulo consiste no estabelecimento de uma metodologia de abordagem de camada enlace, a partir de parâmetros genéricos de análise (elementos de desempenho). Os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia ao PROFIBUS e ao FIP demonstraram a efetividade desta abordagem, devido ao grande volume de informações que permitem levantar.

4. ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO

4.1 INTRODUÇÃO

O Capítulo 3, além de estabelecer os critérios e a metodologia do estudo a ser desenvolvido, permitiu obter informações sobre o desempenho das propostas FIP e PROFIBUS, para condições estáticas e específicas de operação.

Entretanto, para uma análise mais geral do seu comportamento, é necessário utilizar um modelo que combine a representação da evolução dos estados do "field-bus", com as temporizações associadas a esta evolução, em condições dinâmicas de operação.

Para este fim, adotou-se como ferramenta de modelagem as Redes de Petri (RdP) Temporizadas, que permitem descrever o comportamento dos serviços da camada enlace, associando intervalos de tempo à evolução das suas operações internas e sistêmicas. Adicionalmente, para obtenção dos valores médios dos tempos determinantes do desempenho, utilizou-se uma extensão das RdP Temporizadas, que associa funções densidade de probabilidade aos intervalos de tempo citados anteriormente, na forma de Redes de Petri Temporizadas Extendidas (RdPTE). No Anexo 7.2 é apresentada uma descrição geral das RdP e das suas extensões, utilizadas no presente estudo.

O presente capítulo apresentará uma análise comparativa de desempenho das propostas PROFIBUS e FIP, segundo a

seguinte sistemática:

- modelagem dos serviços da camada enlace em RdPTE;
- simulação dos modelos obtidos e obtenção dos resultados de interesse para a avaliação do desempenho, em um Analisador/Simulador de Redes de Petri (ARP - Anexo 7.3 [LCM189]);
- análise comparativa dos resultados obtidos e avaliação final quanto ao desempenho de cada proposta, suas vantagens e restrições;
- análise de alternativas para a camada enlace, à partir dos resultados anteriores.

Conforme definido no Capítulo 3, a nível da comparação entre o PROFIBUS e o FIP, dois conjuntos básicos de condições de execução dos modelos foram desenvolvidos:

- simulação dos modelos dos serviços individuais, sem concorrência com outros serviços e em configurações mono-controlador;
- simulação de modelos resultantes da combinação dos modelos dos serviços individuais (modelos combinados), utilizados na avaliação da qualidade dos serviços, em condições determinadas de operação, tais como: concorrência entre os diversos serviços no âmbito da estação ou a nível do barramento, configurações mono e multi-controlador, taxas variáveis de requisição dos serviços e de serviços concorrentes, perdas físicas variáveis, dentre outras, definidas em detalhe posteriormente.

Cabe destacar que o modelo de camada enlace utilizado na avaliação de desempenho (fig. 3.1) é caracterizado por 3 fluxos de informação, constituídos à partir dos serviços elementares (individuais), ativados por t_{at} e t_{u} , e que ocupam a camada enlace até a sua máxima capacidade (Q_i), no fornecimento de uma capacidade de transmissão aos usuários Q_u , com um nível de perdas (P_f), a uma eficiência ($E\% = Q_u/Q_i$)

4.2 MODELAGEM

O objetivo da modelagem dos serviços em RdPTE consiste em estabelecer representações que permitam a obtenção dos resultados esperados com a focalização do estudo de desempenho, definidos no Capítulo 3.

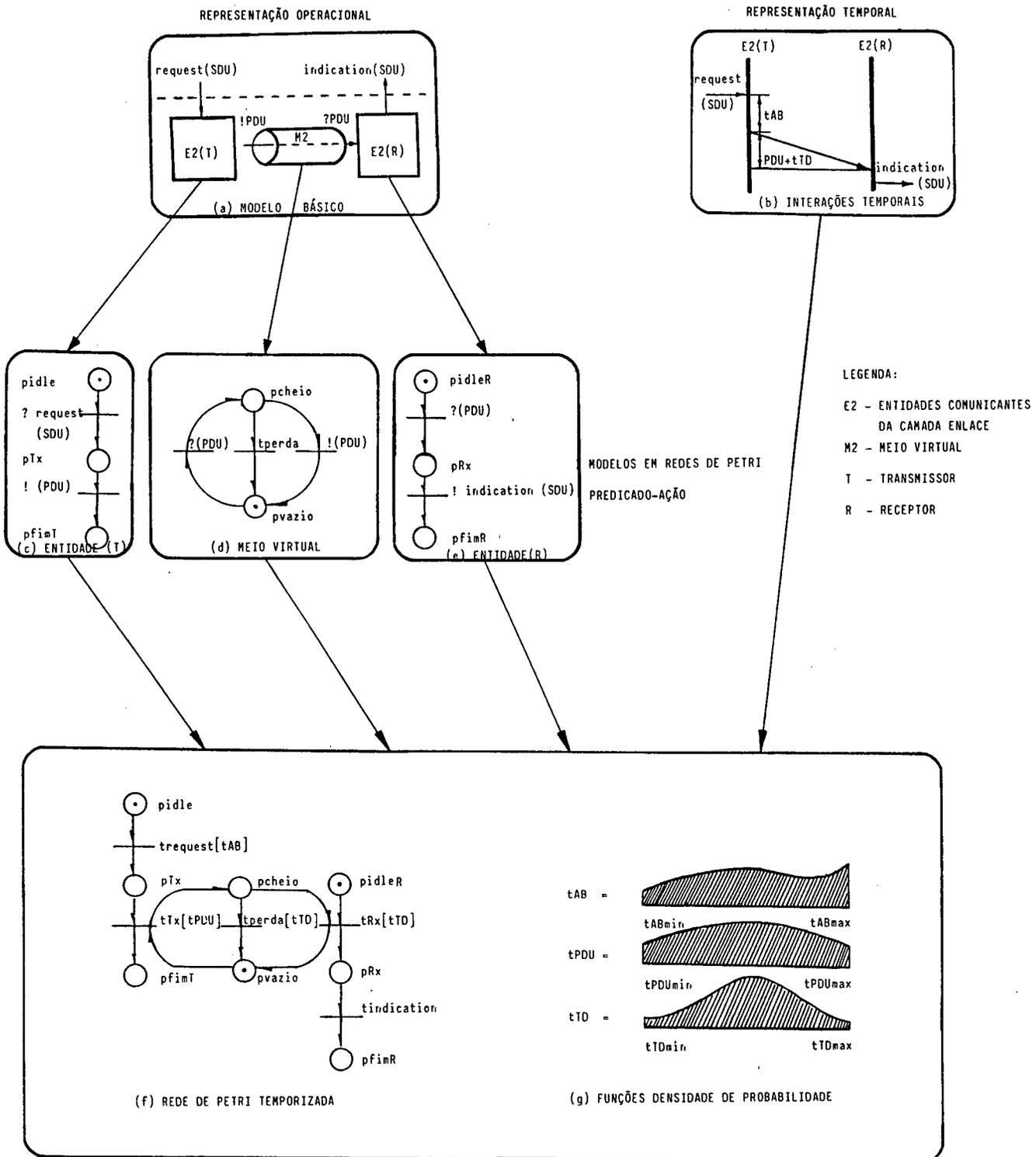
4.2.1 Metodologia de Modelagem

4.2.1.1 Técnica de geração dos modelos

Os modelos em RdPTE de cada serviço foram construídos à partir das informações apresentadas nas análises operacional e temporal (Capítulo 3).

O processo de geração dos modelos obedeceu a seguinte ordem, esquematizada na figura 4.1:

- representação em RdP Predicado-Ação das entidades da envolvidas em cada serviço (fig. 4.1.c, d e e), identificando, principalmente, os pontos de interação entre as entidades e as principais operações internas a



MODELOS EM REDES DE PETRI TEMPORIZADAS E EXTENDIDAS (RdPTE)

FIGURA 4.1 - Técnica de geração dos modelos em RdPTE

- cada uma delas, à partir do modelo de cada serviço (fig. 4.1.a);
- construção do modelo global do serviço, à partir da fusão das transições nos modelos de entidades e do meio virtual, nas quais o predicado em um modelo corresponde a uma ação no outro, e associação das informações de tempo (da análise temporal) relativas às interações entre as entidades, resultando numa representação em RdP Temporizadas (fig. 4.1.f);
 - associação de uma função densidade de probabilidade aos intervalos de tempo de cada transição representativa dos tempos internos e sistêmicos, resultando numa representação do serviço em RdPTE (fig. 4.1.f e g).

4.2.1.2 Estratégia de incorporação do erro de transmissão

Para representação de uma camada física real, incorporou-se no modelo em RdPTE do meio físico o conceito de "porcentagem de perdas introduzidas pela camada física" (fig. 4.1.d).

No modelo de meio físico (fig. 4.1.f), o disparo de t_{Tx} introduz uma mensagem no mesmo ($p_{cheio} = 1$), que pode seguir dois caminhos para seu "esvaziamento": consumo pela outra entidade (t_{Rx}) ou perda (t_{perda}). Em t_{perda} estão concentradas todas as condições possíveis de incorporação de erros na informação em trânsito: deterioração, perda de caracteres, etc.

Como t_{perda} e t_{Rx} estão em conflito, introduziu-se o conceito de probabilidade relativa de disparo de t_{perda} em relação a t_{Rx} . Com isso, pode-se representar meios físicos com

"eficiência" determinada (diferente de 100%), correspondente ao percentual de "frames" transmitidos com sucesso.

Para se introduzir a probabilidade relativa de disparo entre duas transições em conflito, à partir das funções densidade probabilidade intrínsecas (que não consideram os conflitos entre transições), definiu-se funções densidade de probabilidade extrínsecas (que levam em conta os conflitos entre transições). Esta definição consistiu em se calcular um novo intervalo de disparo para uma das transições, através da extensão do intervalo original, de forma a se garantir um certo número de disparos de uma transição em relação a outra [AGUI689].

4.2.2 Modelagem dos serviços

A metodologia de modelagem foi aplicada a cada um dos serviços descritos do FIP e do PROFIBUS, na consecução dos modelos dos serviços individuais. Adicionalmente, através de combinações dos modelos individuais, se construiu os modelos combinados.

A seguir é apresentado um exemplo ilustrativo dos resultados obtidos com o trabalho de modelagem, segundo a metodologia descrita anteriormente. O exemplo enfocará a modelagem do serviço SDA do PROFIBUS, por ser uma das RdPTE mais simples que se obteve. Este modelo está indicado na figura 4.2 (e 4.2.a do ponto de vista do usuário - modelo equivalente reduzido), onde:

- o serviço inicia com t_{req} e é concluído: na estação local com: t_{OK} (com sucesso) ou t_{nOK} (com erro de

- comunicação) ou tTO (com "time-out"); e na estação remota com: tind;
- p1, p2, p3, p4, pY, pZ, representam o meio físico;
 - tprdT e tprdR representam a perda ou erro nos "frames", durante a iniciação e recepção, respectivamente;
 - tprdT, tprdR, tTD1, tcheg e tRX concentram os intervalos de disparo representativos dos atrasos de propagação da informação no meio físico;
 - tCAR consiste na transmissão do primeiro caracter de um "frame", à partir do qual tcheg é excitado, o que indica o início da recepção de uma resposta pela estação local;
 - o estado inicial deste modelo consiste em: $M(p2) = M(p4) = M(pz) = 1$ (meio físico vazio), $M(pOp) = M(pOC) = M(pgate) = 1$ e $par = n_r$ (entidades em "idle state");
 - as demais transições são equivalentes aos tempos descritos no Capítulo 3.

Algumas considerações importantes em torno deste modelo são:

- a transmissão do primeiro caracter da resposta (tCAR) não está sujeita a erros devido ao meio físico (inexistência de transição de perda entre pY e pZ). Mesmo que este caracter não seja íntegro, a sua recepção para a contagem de t_{eL} , que é o objetivo da representação;
- não representa explicitamente as diferentes respostas possíveis do respondedor (UE, RR, OK, etc.);

- não representa o mecanismo de controle de duplicação de "frames", por ser irrelevante do ponto de vista temporal.

O Grafo de Classe de Estado da RdPTE do serviço SDA é apresentado na figura 4.3, tendo sido gerado para verificação do modelo.

Esta mesma sistemática de representação foi utilizada nos demais serviços e em combinações dos mesmos, resultando no conjunto de modelos descritos no Anexo 7.4. Estes modelos consistem, basicamente, na representação dos seguintes serviços e condições.

4.2.2.1 PROFIBUS

Os modelos em RdPTE para representação dos serviços individuais (elementares) e dos serviços combinados do PROFIBUS foram os seguintes:

a. Serviços individuais:

- Serviços RDR/SRD: representação similar à do serviço SDA,
- Serviço SDN;
- Transferência do "token" (TOK) de uma estação (TS) para a estação seguinte (NS).

b. Serviços combinados:

- Serviços CRDR e CSRD (P): representação da Poll_list (n_p) e dos mecanismos de controle, para utilização dos modelos dos serviços individuais (RDR e SRD) e do

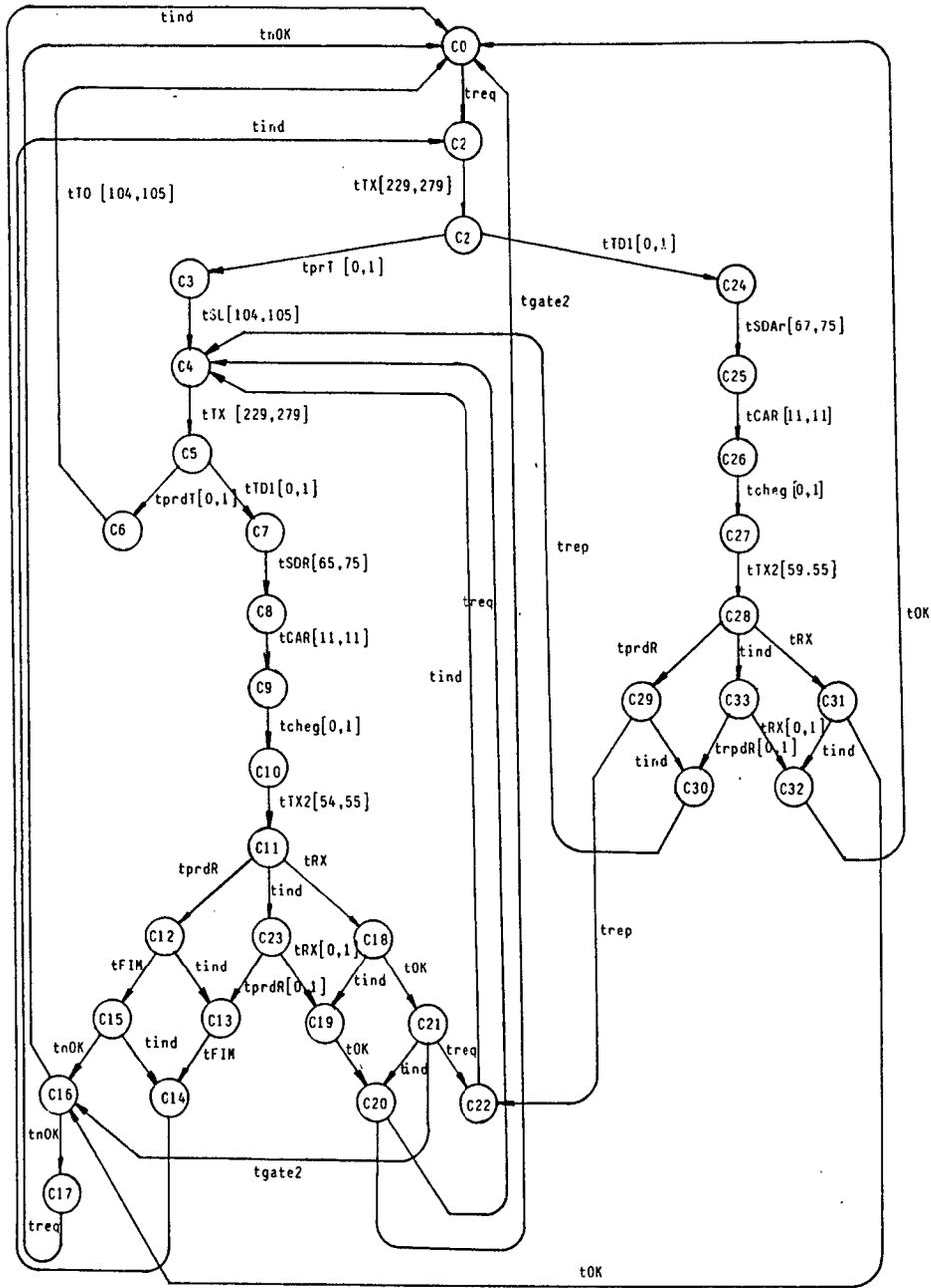


FIGURA 4.3 - Grafo de classe de estado do serviço SDA

- mecanismo de controle de prioridade, para representação da concorrência com outros serviços;
- Rotação do "token" por "n" estações mestre (TRR);
 - Utilização do "token": representação da rotação do "token" por "n" estações mestre, do ponto de vista de uma das estações (TTH), permitindo a combinação deste modelo com os modelos de transferência de informação, na representação de uma configuração multi-controlador;
 - Serviços aperiódico e de mensagem de alta e baixa prioridades, com e sem reconhecimento (UP/M): representação das transições que definem a taxa de solicitação destes serviços pelos usuários da camada enlace (t_u), as filas de transmissão de tamanho limitado e o mecanismo de resolução de prioridade, para permitir o estabelecimento da concorrência com outros serviços;
 - Serviço periódico em configuração multi-controlador, perturbado pela rotação do "token";
 - Serviços aperiódico e de mensagem em configuração multi-controlador, perturbados pela rotação do "token";
 - Serviços aperiódicos e de mensagem concorrendo entre si (MUP/M);
 - Serviços periódico, aperiódico e de mensagem concorrendo entre si (SR): representação de uma configuração mono-controlador mais geral possível;
 - Serviços periódico, aperiódico e de mensagem concorrendo entre si, e perturbados pela rotação do

"token": representação de uma configuração multi-controlador mais geral possível.

Na tabela da figura 4.4 são apresentados os diversos modelos descritos acima, através de suas siglas; das combinações que os compõem, se forem modelos combinados; e dos resultados a serem obtidos da sua simulação.

| | Modelos | Combinações | Resultados | Descrição |
|-------------|-------------|-----------------------|--|--|
| INDIVIDUAIS | SDA/RDR/SRD | - | Q_u, E_X, P_f | serviços elementares de transferência de |
| | SDN | - | Q_u, E_X, P_f | informação |
| | TOK | - | E_X, P_f | Transferência do "Token" |
| COMBINADOS | TRR | TOK | O_{tRR} | rotação do "token" |
| | TTH | TOK | - | utilização do "token" |
| | P | RDR | t_p, t_{BR} | periódico |
| | UP/M | RDR | t_{AB} | aperiódico/de mensagem |
| | - | P + TTH | t_p, t_{BR} | periódico multi-controlador |
| | MUP/M | UP/M + UP/M | t_{AB} | aperiódico/de mensagem concorrentes |
| | - | MUP/M + TTH | t_p, t_{BR}, t_{AB} | aperiódico/de mensagem multi-controlador |
| | SR | P + MUP/M | t_p, t_{BR}, t_{AB} | periódico, aperiódicos/de mensagem |
| - | SR + TTH | t_p, t_{BR}, t_{AB} | periódico, aperiódicos/de mensagem multi-controlador | |

FIGURA 4.4 - PROFIBUS - Tabela dos modelos em RdPTE dos serviços

4.2.2.2 FIP

Similarmente ao PROFIBUS, os modelos em RdPTE, desenvolvidos para representação dos serviços individuais e dos serviços combinados do FIP, foram os seguintes:

a. Serviços individuais:

- Serviço TB/MN: representação do serviço TB e da fase MN do serviço SDN;
- Serviço IDRQ (UP): representação da fase de transferência da lista de variáveis aperiódicas do produtor/consumidor para o árbitro (IDRQ);
- Serviço MA (SDA): representação da fase de efetiva execução da transferência (MA), na janela de mensagem do serviço SDA.

b. Serviços combinados:

- Serviço periódico (P): representação de uma janela periódica de um ciclo elementar, para a execução de n_p serviços TB;
- Serviço aperiódico (UP): representação de uma janela aperiódica de um ciclo elementar, para a execução dos serviços aperiódicos de alta e baixa prioridades, solicitados na janela periódica, até a máxima dimensão das filas de transmissão (n_{UPH} e n_{UPL}), dentro do limite de tempo da janela;

- Serviço de mensagem (M): representação de uma janela de mensagem de um ciclo elementar, para a execução dos serviços de mensagem com e sem reconhecimento, solicitados na janela periódica, até a máxima dimensão das filas de transmissão (nMA e nMN);
- Ciclo elementar (SR): representação de um ciclo elementar completo, em suas janelas periódica, aperiódica e de mensagem, ou de ciclos elementares reduzidos (p.ex. janelas periódica e aperiódica), com opções para macro-ciclo sincronizado ou sem sincronização, na avaliação combinada de todos os serviços do FIP.

Na tabela da figura 4.5 são apresentados os diversos modelos descritos acima, através de suas siglas; das combinações que os compõem, se forem modelos combinados; e dos resultados a serem obtidos da sua simulação.

| | Modelos | Combinações | Resultados | Descrição |
|-------------|---------|-------------|------------------------|---|
| INDIVIDUAIS | TB/MN | - | Q_u, EX, P_r | serviço TB e fase MN do serviço SIM |
| | IDRO | - | - | transferência da lista de variáveis aperiódicas |
| | MA | - | Q_u, EX, P_r | fase MA do serviço SIM |
| COMBINADOS | P | TB | t_p, t_{MN} | janela periódica |
| | UP | IDRO + TR | Q_u, EX, P_r, t_{MN} | janela aperiódica |
| | M | (MA) + (MN) | Q_u, EX, P_r, t_{MN} | janela de mensagem |
| | SR | P + UP + MN | t_p, t_{MN}, t_{MA} | ciclo elementar |

FIGURA 4.5 - FIP - Tabela dos modelos em RdPTE dos serviços

4.3 CRITÉRIOS E METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Em cada um dos diferentes modelos obtidos no item anterior, realizou-se as seguintes operações, utilizando as ferramentas do ARP (Anexo 7.3 [LCMI89]):

- geração do grafo de classe de estado do modelo (p. ex.: figura 4.3 para o serviço SDA);
- validação dos modelos quanto à sua correção (verificação através das propriedades da RdPTE e do grafo de classe de estado);
- execução de repetidas simulações nos modelos e medição do tempo médio e desvio padrão para evoluir de uma (ou mais) marcação inicial (um dos estados do grafo da figura 4.3) a uma ou mais marcações destino; e do percentual de alcance de cada uma destas marcações, até se atingir variações inferiores a 1% nos resultados (medida elementar).

A seguir serão definidas as condições utilizadas para a simulação dos modelos, no que se refere às situações que se pretende simular e, em decorrência, os dados de entrada para as RdPTE, na obtenção de cada um dos elementos de desempenho.

Adicionalmente, serão representadas algumas limitações do estudo, decorrentes dos processos de modelagem e simulação.

4.3.1 Condições de simulação

Conforme apresentado no Capítulo 3, os resultados de interesse para o estudo de desempenho, são os seguintes:

a. Serviços elementares (modelos individuais):

- Capacidade de transmissão (Q_u);
- Eficiência do controle de erros (P_f);
- Eficiência da transferência de informação ($E\%$).

b. Serviço periódico (modelos combinados):

- Uniformidade, através do tempo de execução de " n_p " transações do serviço periódico (t_p);
- Periodicidade, através tempo de reação do sistema (t_{MR}), obtido da medição do tempo entre duas execuções sucessivas do serviço periódico.

t_p e t_{MR} são avaliados em diversas condições de concorrência e configurações dos modelos envolvidos.

c. Serviços aperiódico e de mensagem (modelos combinados):

- Tempo de execução de n_{UP} transações aperiódicas e de mensagem, como uma medida indireta de t_{MR} , em diversas condições de concorrência e configurações dos modelos envolvidos.

Na definição das condições de obtenção das medidas elementares: estabeleceu-se os dados de entrada dos modelos individuais, com base nos tempos internos e sistêmicos; combinou-se os modelos individuais (fig. 4.4 e 4.5) de forma a criar as condições características para os modelos combinados.

Contudo, a diversidade de possibilidades de configurações e a multiplicidade de combinações de dados de entrada tornam difícil um estudo completo. Com isso, fez-se necessário limitar

o escopo de abrangência do estudo, através da definição de valores determinados para os dados de entrada dos modelos, apresentados a seguir, obedecendo a classificação das condições em modelos individuais e combinados. Estas condições serão aplicadas ao PROFIBUS e o FIP, para permitir uma comparação em situações equivalentes.

4.3.1.1 Modelos individuais

Na obtenção dos resultados relativos aos serviços individuais, se utilizou como referência os dados e condições estabelecidos em [ISA187] [NEMA288], em termos de: dimensão do L_{sdu} , taxas de transmissão e tipos de implementação, para os seguintes níveis de desempenho:

- H1: 10 mensagens/s (msg/s)(ISA), equivalente a um tempo de serviço de 100 ms;
- H2: 1600 msg/s (ISA), 4000 msg/s (NEMA), equivalentes a um tempo de serviço (t_a) de 625 us e 250 us, respectivamente.

Os valores assumidos pelos tempos internos e sistêmicos e as condições de avaliação dos modelos individuais foram os seguintes:

a. Capacidade de transmissão (Q_u):

a.1 PROFIBUS:

Os tempos especificados no Capítulo 3, foram aplicados aos modelos, para 0 % e 1 % de perdas físicas e implementações tipo "C" e tipo "B", correspondente aos "field-bus" H1 e H2 [ISA187], respectivamente.

Adicionalmente a esses tempos, se adotou:

$$n_r = 1$$

t_{TF}/t_{RF} : definidos em função dos "frames" envolvidos em cada serviço (fig. 3.8), varia com a distância de Hamming e com a dimensão do L_{sdu} . Os valores de L_{sdu} aplicados aos diversos tipos de "frame", foram 32 bit para H1 e 64 bit para H2, para as seguintes configurações de "frame" resposta: resposta longa, para o serviço SDA, e $RF = DAT/DRH$, para os serviços RDR e SRD;

$t_{TDmax} = 1$ bit, para manter constante a proporção: $t_{TD} \sim 1.f$, para H1 e H2.

a.2 FIP:

O modelo para simulações verdadeiramente individuais do FIP é o serviço TB. Resultados "individuais" equivalentes para os serviços aperiódicos e de mensagem com e sem reconhecimento podem ser obtidos somente à partir de modelos combinados (fig. 4.5).

Similarmente ao PROFIBUS, esses modelos serão executados para 0 % e 1 % de perdas físicas. Entretanto, o FIP apresenta apenas um único conjunto de tempos de implementação, válido para qualquer taxa de transmissão, conforme descrito no Capítulo 3. Adicionalmente, adotou-se:

t_{TF}/t_{RF} : identificados pela sigla do "frame" em questão (t_{PDU} - PDU's da figura 3.18), definidos conforme o serviço a ser simulado e o L_{sdu} utilizado, similarmente ao PROFIBUS.

$t_{TDmax} = 1$ bit, similar ao PROFIBUS.

b. Controle de Perdas:

Foram adotadas as mesmas definições de Q_u , mas restritas à implementação H2, $HD = 4$ (PROFIBUS) e para perdas físicas e " n_p " variáveis.

c. Eficiência da transferência de informação (E%):

Foram adotadas as mesmas condições de Q_u , mas restritas à implementação H2, 0 % de perdas físicas e para L_{sdu} variável.

4.3.1.2 Modelos combinados

O objetivo do estudo da qualidade dos serviços periódico, aperiódico e de mensagens, relacionado com os modelos combinados, é se avaliar a eficiência com que a camada enlace (fig. 3.1) implementa estes três serviços, considerando os seus mecanismos internos de operação e a interação mútua entre os serviços.

As características a serem estabelecidas, para aplicação nos modelos combinados, são as seguintes:

- as classes de serviços que serão modeladas e os serviços elementares utilizados em cada classe;
- o número total de transações periódicas (n_p) executadas por ciclo de processo;
- a capacidade total de enfileiramento de solicitações aperiódicas (n_{UP}) e de mensagem (n_M);

- a taxa total de geração de informações (aperiódicas e de mensagem), dada pela soma das taxas de cada controlador ($1/t_u$);
- a dimensão do L_{sdu} presente em cada transferência de informação.

Para fixação dessas condições é necessário, inicialmente, se caracterizar a forma de implementação dos fluxos de informação nos mesmos:

- Serviço periódico:

No FIP, o fluxo periódico é sistêmico e planejado para todos os controladores, independentemente do número de controladores. No PROFIBUS o fluxo periódico é individualizado por controlador, portanto, dependente do número de controladores.

- Serviço aperiódico e de mensagem:

No FIP a solicitação destes serviços é ativada em cada controlador e a execução dos mesmos é enfileirada no árbitro, em uma ordem de prioridade única para todo o FIP. No PROFIBUS a solicitação e enfileiramento são operações locais aos controladores.

Neste contexto, estabelecimento das condições de simulação, ter-se-á que obedecer as seguintes relações:

$$n_p(\text{PROFIBUS}) = n_p(\text{FIP})/n$$

$$n_{UP}(\text{PROFIBUS}) = n_{UP}(\text{FIP}) \times n_{IDA}/n$$

$$n_M(\text{PROFIBUS}) = n_M(\text{FIP})/n$$

$$t_u(\text{PROFIBUS}) = n \times n_{IDA} \times t_u(\text{FIP})$$

onde:

- as características no FIP são sistêmicas (para todo o "field-bus") e no PROFIBUS, são por controlador (mestre);
- considera-se que os fluxos e operações dos "n" controladores do PROFIBUS são idênticos;
- na definição da dimensão das filas de transmissão do FIP, utiliza-se $nUP.nIDA$, devido à possibilidade de se associar a transmissão de mais de uma variável a uma solicitação.

Quando se mencionar posteriormente estas características, sem se especificar a proposta, estará se referindo às características sistêmicas.

À partir destas considerações, as condições aplicadas aos modelos combinados são as seguintes:

a. Serviços de interesse:

Na configuração da figura 3.1 tem-se múltiplas possibilidades de combinações dos serviços periódico, aperiódico e de mensagem: um único tipo de serviço (3 combinações); dois tipos de serviço (combinação 2 a 2 num total de 6 combinações); os três tipos simultaneamente, sem considerar, ainda, subdivisões em serviços de alta e baixa prioridades, com e sem reconhecimento. Assim, optou-se por se

estudar os serviços periódico e aperiódico de alta e baixa prioridades e combinações deles, devido:

- a ocorrência do serviço de mensagem ser significativamente menor que a dos serviços periódico e aperiódico;
- aos fluxos de informação dos serviços periódico e aperiódico constituírem a maior parte do volume de informação do "field-bus";
- à menor criticidade em termos de tempos de resposta no serviço de mensagem;
- a possibilidade do estudo da influência da prioridade na execução dos serviços (presentes somente nos serviços aperiódicos do FIP).

No caso do FIP, estes serviços correspondem às janelas periódica e aperiódica.

O PROFIBUS não fixa janelas e serviços elementares para cada tipo de serviço. Neste contexto, adotar-se-á o serviço RDR na representação de cada transação periódica e aperiódica individual (modelo individual), por ser:

- equivalente ao serviço SDA em termos de t_m ;
- mais usual que o SRD e SDN.

b. Ciclo de sistema (T):

O valor do ciclo de sistema está estreitamente relacionado com: os tempos de processo, o tempo de execução do serviço periódico (t_p) e com a definição de t_{CE} no FIP e de t_{RR} no PROFIBUS. Adotou-se $T = 8 \text{ ms}$ como referência, por ser um

valor usual das indicações de desempenho [NEMA288] [FIP89], como ciclo típico de processo, equivalente a aproximadamente a metade de um ciclo de rede elétrica de 60 Hz.

Em configurações em que o ciclo do sistema está presente, nos modelos a serem simulados, o seu valor será "T" ou um múltiplo inteiro de "T".

c. Dimensão do L_sdu:

O número de bits do L_sdu, pode assumir qualquer valor dentro do limite de tamanho do "frame", mas existem dimensões usuais nas indicações de desempenho: 32 e 64 bit. Assim adotou-se $L_{sdu} = 32$ bit, por ser compatível com os valores de ciclo de processo e n_p (por exemplo, permitindo a execução de 50 transações periódicas (TB), no FIP).

d. Número de transações periódicas por ciclo de sistema:

Sendo $T = 8$ ms, para uma ocupação de pelo menos 50 % do tempo útil do barramento em um ciclo (T) com o serviço periódico, e adotando-se o FIP como referência, tem-se:

$$25 < n_{p(FIP)} < 50$$

Para comparação com PROFIBUS:

$$n_{p(Profibus)} = n_{p(FIP)} / n, \text{ para } 2 < n < 30$$

Para se ter valores inteiros para "n" e "n_p" e:

$$n_{p(Profibus)} \geq 3 \text{ (lista com no mínimo 3 elementos)}$$

Adotou-se:

$n_p\langle FIP \rangle = 30$, independente de "n"

$n_p\langle PROFIBUS \rangle = 30$, para $n = 1$ ou

$n_p\langle PROFIBUS \rangle = 6$, para $n = 5$ ou

$n_p\langle PROFIBUS \rangle = 10$, para $n = 3$

Estes valores permitem a representação de configurações multi-controlador em condições equivalentes para o FIP e o PROFIBUS. Adicionalmente, apesar de n_p ser definido em função de "T", estes valores serão adotados como referência mesmo em situações onde "T" não está presente.

e. Dimensão das filas aperiódicas $nUPH/nUPL$ (e $nIDA$ no FIP):

Para a definição de $nUPH$ e $nUPL$, que seja compatível com n_p , adotou-se $nUPH = nUPL = 15$, por:

- corresponderem à metade de n_p , para cada nível de prioridade;
- respeitarem a relação $nUP\langle PROFIBUS \rangle = nUP\langle FIP \rangle \cdot nIDA$, e permitirem uma comparação direta dos resultados. As combinações possíveis, neste caso, para que os valores de $nUP\langle FIP \rangle$ e $nIDA$ resultem inteiros são $nUP\langle PROFIBUS \rangle = 15 = nUP\langle FIP \rangle \cdot nIDA = 1 \times 15, 3 \times 5, 5 \times 3, 15 \times 1$.

f. Taxa de requisição do serviço aperiódico (t_{LUP}):

A taxa de requisição (em mensagens/s ou $1/t_{LUP}$) com que os usuários requisitam a execução dos serviços aperiódicos da

camada enlace é uma das variáveis livres (independentes) dos modelos.

A variação de t_{LAP} corresponderá distintas condições em termos de nível de concorrência entre os serviços periódico e aperiódico.

g. Tempos internos e sistêmicos:

Adotou-se as mesmas definições de Q_u (modelos individuais), mas restritas à implementação H2 e $H_D = 4$ (PROFIBUS), para $L_{\text{sdu}} = 32$ bit.

Além deste conjunto de definições genéricas, foram definidas condições específicas, para cada elemento de desempenho, apresentadas no item 4.4.

4.3.2 Limites do estudo

4.3.2.1 Modelagem

a. Função densidade de probabilidade:

Por uma limitação da atual versão do ARP (Anexo 7.3 [LCMI89]), as funções densidade de probabilidade estabelecidas para todas as transições do modelo devem ser idênticas. Adotou-se, então, uma função densidade de probabilidade uniforme.

b. Representação de erros de transmissão:

As restrições impostas a estratégia de incorporação de erros de transmissão (item 4.2.1.2), inerentes a ferramenta

utilizada no ARP, consiste na limitação dos intervalos de disparo estáticos das transições a valores inteiros, limitando a resolução dos percentuais de erros resultantes ao intervalo [0, 32000].

Adicionalmente, só foi viável calcular a probabilidade relativa de disparo entre duas transições em conflito, através da estratégia adotada, pelo fato das funções densidade de probabilidade serem uniformes.

c. Tempo e número de modelos:

À partir das especificações das propostas, foram desenvolvidos 4 versões de modelos em RdPTE, num total de 50 redes, até se obter os 14 modelos apresentados no Anexo 7.4.

d. Modelos combinados:

Devido ao limite de capacidade do ARP e à complexidade nas representações envolvidas, os modelos combinados foram concebidos para representarem o comportamento do "field-bus", do ponto de vista do árbitro do barramento, no FIP e de uma das estações controladoras, no PROFIBUS.

Esta restrição considera que o comportamento das demais estações controladoras do PROFIBUS será equivalente ao da estação representada, no seu tempo disponível para a retenção do "token".

e. Generalidade dos modelos:

A modelagem em RdPTE se propõe avaliar o desempenho frente a condições dinâmicas de operação. Contudo, mesmo nestes modelos fez-se necessário fixar certas características, algumas das quais foram apresentadas no item 4.3.1, com o intuito de simplificá-los.

Dentre elas, cabe destacar:

- a utilização de um serviço elementar único nos serviços periódico e aperiódico do Profi-bus (RDR), a dada implementação e distância de Hamming;
- a fixação do L_sdu nos modelos combinados;
- a não utilização das distintas opções do PROFIBUS: tipos de "frames", tipos de resposta (curta e longa) campos de endereçamento de segmento/LSAP's, etc., para limitar o número de combinações;
- a fixação do tamanho da lista de identificadores do serviço aperiódico do FIP (nIDa = 1 ou 3);
- a não representação das operações de escrita/leitura local dos serviços periódicos;
- a representação do "field-bus" em regime permanente, sem considerar condições de falha, configuração e reconfiguração;
- as considerações em torno de indefinições nas especificações das propostas, com destaque para o estabelecimento dos intervalos dos tempos internos e sistêmicos, para condições médias de operação (Capítulo 3).

f. ARP:

A principal limitação do ARP na modelagem, refere-se à não disponibilidade da representação da prioridade relativa de disparo de 2 (ou mais) transições em conflito, para facilitar a: incorporação da porcentagem de erros de transmissão no meio físico; construção de modelos temporais equivalentes reduzidos das RdPTE, baseados na redução dos caminhos paralelos nos grafos de classe de estado (fig. 4.3) à uma transição e um lugar.

g. Aderência às especificações:

Os modelos em RdPTE foram criados com base nas especificações das propostas disponíveis na ocasião do seu desenvolvimento (principalmente [SIEM87] e [THOM88]). Algumas destas especificações evoluíram no decorrer do trabalho, mas os modelos não puderam ser atualizados para o presente estudo (p.ex.: serviço periódico do PROFIBUS [SIEM88]).

4.3.2.2 Simulação

a. Modelos combinados:

As RdPTE dos modelos combinados consistem em representações obtidas à partir das combinações dos modelos individuais, como se fossem sub-redes dos primeiros. Contudo, devido às limitações do ARP, não há possibilidade de se promover a fusão de redes (à partir de sub-redes) ou se

estabelecer modelos temporais reduzidos, à partir dos quais se possa estabelecer redes mais complexas. Os modelos combinados em RdPTE são criados e executados no ARP como redes individuais. Com isso, o tempo de entrada dos dados para simulação (item "b") aumenta sensivelmente com a complexidade do modelo, obrigando a sua simplificação.

b. Tempo e número de simulações:

As simulações foram feitas em micro-computadores compatíveis com IBM PC-XT. O número de simulações e o tempo de processamento correspondente, para execução de cada modelo, variou em função do seu tamanho, da sua topologia e da existência ou não de conflitos e paralelismo de eventos no mesmo. Por exemplo, para o serviço SDA foram executadas em torno de 700 simulações, que caracterizam um resultado, com duração aproximada de 2 minutos.

Foram executadas cerca de 700 medições com esta média de simulações, totalizando 200 horas de simulação. Considerando ainda os tempos de entrada/saída de dados e operação do ARP, foram consumidos 1000 homens x hora. Estes valores só foram possíveis com as simplificações introduzidas na modelagem e simulação.

c. ARP:

A principal limitação do ARP na simulação, refere-se à impossibilidade de fixação de marcações origem e destino,

independentemente da marcação inicial, na simulação de uma RdPTE reinicializável. Com esta possibilidade, em uma RdPTE colocada para evoluir livremente, quando determinada marcação coincidissem com uma marcação origem, seria iniciada a contagem do tempo e quando uma marcação coincidissem com uma marcação destino, seria concluída a contagem do tempo sem reinicializar a rede (uma simulação), tornando a simulação mais livre, dinâmica e sujeita a condições aleatórias ou decorrentes de estados anteriores.

A versão atual, a cada simulação, reinicializa a marcação origem (igual à marcação inicial), após alcançar a marcação destino.

4.4 ANÁLISE DETALHADA DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados das simulações e serão tecidos comentários comparativos entre o PROFIBUS e o FIP, segundo as condições descritas no item 4.3.1, aliadas à aplicação dos dados de entrada e condições específicas de simulação descritas a seguir.

Nos resultados em forma de gráfico, é importante notar que:

- nas funções com duas variáveis independentes, tipo $y = f(x, z)$, a primeira variável é representada no eixo das abscissas e a segunda através de uma curva específica do gráfico, para cada um dos seus valores;
- nas funções com variáveis discretas (p.ex.: n_{IDa} , n_p , etc.), as curvas foram representadas como se fossem contínuas, para permitir a visualização das tendências.

4.4.1 Capacidade de Transmissão

Os resultados medidos nos modelos foram t_e e dt_e e à partir destes resultados foram calculados os valores Q_u ($1/t_e$), que serão analisados individual e comparativamente, parametrizados pelas indicações de capacidade de transmissão (em msg/s), estabelecidas pelos órgãos avaliadores (fig. 2.8).

4.4.1.1 PROFIBUS

a. Resultados das simulações dos serviços individuais:

Para o PROFIBUS foram obtidos 6 conjuntos de resultados de Q_u , em 3 taxas de transmissão (duas para H1 e uma para H2), duas distâncias de Hamming (HD) e 0 e 1 % de perdas físicas, para cada um dos serviços individuais (SDA, RDR, SRD e SDN), conforme a tabela da figura 4.6.

| tipo | H1 (L_sdu = 32 bit) | | | | | | | | H2 (L_sdu = 64 bit) | | | | | |
|------------------|---------------------|----|----------|----|-----|-----|---------|-----|---------------------|------|----------|------|----|--|
| | f | | 9,6 kbps | | | | 90 kbps | | | | 500 kbps | | | |
| | HD | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | | | |
| Q_u (msg/s) | perdas | 0% | 1% | 0% | 1% | 0% | 1% | 0% | 1% | 0% | 1% | 0% | 1% | |
| SDA | 40 | 39 | 52 | 51 | 315 | 312 | 391 | 303 | 1316 | 1299 | 1389 | 1370 | | |
| RDR | 40 | 40 | 52 | 52 | 315 | 310 | 391 | 305 | 1316 | 1299 | 1389 | 1370 | | |
| SDN | 54 | 54 | 72 | 72 | 478 | 478 | 625 | 625 | 1961 | 1961 | 2041 | 2041 | | |
| SRD | 61 | 60 | 84 | 83 | 498 | 487 | 636 | 645 | 2128 | 2105 | 2247 | 2198 | | |

FIGURA 4.6 - PROFIBUS - Tabela de capacidade de transmissão
(Q_u)

b. Análise individual:

Analisando-se estes resultados (fig. 4.6) observa-se que as diferenças de capacidade de transmissão (Q_u), decorrentes da utilização de duas distâncias de Hamming, são mais significativas para H1 que para H2. Isto significa que a melhoria na eficiência da codificação do "frame" com HD = 2 é menos determinante de Q_u que os tempos internos, na medida em que a taxa de transmissão aumenta. O que indica que o ganho em desempenho, com HD=2, não compensa a perda em integridade, inutilizando a sua aplicação.

O serviço de maior capacidade de transmissão é o SRD, seguido do SDN (10 % menor) e do SDA/RDR (40 % menor).

Observa-se, em linhas gerais, que o PROFIBUS H1 é 72 % a 97 % mais lento que H2, dependendo de HD e da taxa de transmissão. A desproporção entre as diferenças de Q_u , comparadas com as diferenças das respectivas taxas de transmissão, demonstram o desnível de desempenho das implementações "C" e "B" do PROFIBUS.

Comparativamente aos requisitos dos órgãos avaliadores (fig. 2.8), somente os serviços SDA e RDR do PROFIBUS não atendem os requisitos H2 (ISA). Quanto aos requisitos NEMA, nenhum serviço do PROFIBUS os alcança.

4.4.1.2 FIP

a. Dados e Resultados:

Para o FIP foram obtidos 2 conjuntos de resultados de Q_u , H1 e H2, relacionados com as suas duas taxas de transmissão (50

kbps e 1 Mbps). Para os serviços de mensagem e aperiódico são apresentadas duas condições distintas: fase de efetiva execução da transferência de informação (Q_{UMA} , Q_{UMN} e Q_{URETB}) e o serviço completo (Q_{UBDA} , Q_{UBDN} e Q_{UBP}), para 0 e 1 % de perdas físicas, sendo que a fase de transferência da requisição do serviço do produtor para o árbitro se dá com $L_{sdu} = 0$.

Os resultados e suas condições de obtenção são apresentados na figura 4.7, para os serviços TB, SDA, UP e SDN.

| Qu | tipo | f | H1 (L_sdu = 32 bit) | | H2 (L_sdu = 64 bit) | | |
|---------|--------|-----|---------------------|--------|---------------------|------|------|
| | | | 0% | 1% | 0% | 1% | |
| (msg/s) | perdas | | 50 kbps | | 1 Mbps | | |
| | | | 0% | 1% | 0% | 1% | |
| TB | | | 369 | 371 | 5146 | 5128 | |
| | | | MA | 224 | 212 | 3226 | 3103 |
| SDA | | | 153 | 148 | 2271 | 2206 | |
| | | | SDN | 209 | 210 | 3081 | 3067 |
| MN | | | 369 | 371 | 5146 | 5128 | |
| | | | UP | nIDa=1 | 140 | 142 | 2309 |
| nIDa=3 | 228 | 231 | | 3507 | 3570 | | |
| nIDa=5 | 260 | 265 | | 3915 | 3940 | | |
| RETB | | | nIDa=1 | 197 | 197 | 3105 | 3190 |
| | | | nIDa=3 | 270 | 270 | 4077 | 4083 |
| | | | nIDa=5 | 290 | 290 | 4320 | 4330 |

Legenda - valores dos "frames":

- TB: $t_{TD_DAT} = 57$ bit
 $t_{RP_DAT} = 107$ bit (H2) ou 75 bit (H1)
- SDA: $t_{TD_MSG} = 57$ bit
 $t_{RP_MSG_ACK} = 107$ bit (H2) ou 75 bit (H1)
- SDN: $t_{TD_MSG} = 57$ bit
 $t_{RP_MSG_NDACK} = 107$ bit (H2) ou 75 bit (H1)
- UP: $t_{TD_ROI} = 59$ bit
 $t_{RP_RO} = 43 + 16 \times nIDa$ bit

FIGURA 4.7 - FIP - Tabela de capacidade de transmissão (Qu)

b. Análise individual:

O serviço de maior capacidade de transmissão é o TB, seguido dos demais na seguinte ordem: MN, MA, RETB, SDN, UP, SDA. Contudo, a capacidade de transmissão do serviço UP/RETB é variável segundo nIDa, aproximando-se de Q_{UTB} , na medida que nIDa aumenta.

A queda na capacidade de transmissão com a inclusão da fase de transferência da solicitação do produtor/consumidor para o árbitro nos serviços SDA, SDN e UP é de 30 a 40%.

A diferença de capacidade de transmissão decorrente da variação da taxa de transmissão é proporcional, o que é previsível, em função da adoção de uma única implementação para H1 e H2.

Comparativamente aos requisitos dos órgãos avaliadores, todos os serviços atendem aos requisitos ISA H1 e H2, com razoável margem, mas somente o serviço TB alcança os requisitos NEMA. O serviço UP/RETB alcança marginalmente os requisitos NEMA, para nIDa maior que 3.

4.4.1.3 Análise comparativa

Comparando-se os serviços de maior capacidade de transmissão do FIP (TB) e do PROFIBUS (SRD), observa-se que a máxima capacidade de transmissão do PROFIBUS equivale a cerca de 44 % da máxima capacidade de transmissão do FIP. Quanto aos demais serviços, a relação entre eles é a seguinte: TB, MN, MA, RETB, SDN-FIP, UP, SDA-FIP, SRD, SDN-PROFIBUS, SDA/RDR, onde observa-se que: em um extremo, a capacidade de transmissão de

determinados serviços do FIP é equivalente a do PROFIBUS; no outro, a diferença gira em torno de 4 vezes em favor do FIP. Esta diferença é mais acentuada nos serviços TB, MN, MA, RETB, sendo de menor expressão nos serviços SDN, SDA, UP. O serviço SDA do FIP tem uma capacidade de transmissão equivalente à do serviço SRD do PROFIBUS.

A diferença de capacidade de transmissão entre os serviços no PROFIBUS (até 38 %), não é tão acentuada quanto no FIP (até 56 %), o que mostra que Qu no PROFIBUS é mais homogêneo que no FIP.

A nível das possibilidades e restrições:

- o PROFIBUS apresenta uma taxa de transmissão máxima de 500 kbps, enquanto o FIP opera a 1 Mbps. Para que um acréscimo de taxa de transmissão de 100 % no PROFIBUS, gere uma capacidade de transmissão equivalente à do FIP, este aumento deve ser acompanhado de uma sensível melhoria nos tempos internos da sua implementação H2;
- a capacidade de transmissão do FIP é prejudicada pela necessidade de transferências das requisições do produtor para o árbitro, nos serviços UP, SDN e SDA;
- a capacidade de transmissão do PROFIBUS é prejudicada pela ordem de grandeza dos seus tempos internos, tornando o seu "dead-time" [ISA187] expressivo frente às suas taxas de transmissão.

4.4.2 Perdas finais

As perdas finais (P_f) caracterizam o conjunto de condições descritivas do insucesso na execução do serviço na

camada enlace, e se expressam em função do percentual das perdas físicas (P_p) e do número de repetições das transações do serviço (n_r). Os valores de P_p foram estipulados visando limitar o máximo número de simulações e o tempo de simulação (item 4.3.2.2.b), sem procurar retratar condições reais de meio físico.

P_f analisa a eficiência do controle de perdas pela estação iniciadora (árbitro no FIP e mestre no PROFIBUS), dado que no receptor os mecanismos de controle de perdas e integridade são equivalentes ($HD = 4$).

A função $P_f = f(P_p)$ descreve a capacidade da camada enlace reduzir a transmissão das perdas físicas (percentual de "frames" que se perdem, no tráfego pela camada física) para as perdas finais (percentual de "serviços" que são concluídos sem sucesso). Se as curvas de $P_f = f(P_p)$ forem menores que $P_f = P_p$, os mecanismos de retransmissão estão reduzindo as perdas físicas. Caso contrário não está ocorrendo redução do efeito das perdas físicas e, em alguns casos, P_f pode ser maior que P_p , devido ao número elevado de interações sem retransmissão, num barramento com eficiência determinada.

4.4.2.1 PROFIBUS

No PROFIBUS, as perdas finais são aquelas observadas pelo usuário local, na interface da camada enlace.

a. Dados e resultados:

Foram utilizados no estudo de perdas finais os modelos dos serviços de transferência de informação (SDA, RDR e SRD) e de transferência do "token". Não foi estudado o serviço SDN, pela impossibilidade de P_f ser percebida pelo usuário local.

Nas figuras 4.8 e 4.9 são apresentados os gráficos de perdas finais, para os serviços de transferência de informação (SDA, RDR e SRD) e transferência do "token", respectivamente. Neste gráfico e nos gráficos do FIP o ponto (0,0) foi estabelecido teoricamente.

b. Análise individual:

Constata-se nos gráficos um decréscimo médio de 80 a 90 % nas perdas finais, com a inclusão de uma retransmissão, o que caracteriza uma redução considerável em P_f .

As perdas finais para a transferência do "token" são mais de 50 % menores que as perdas finais para as transferências de informação. Contudo, as especificações do PROFIBUS [SIEM88] indicam a necessidade de até duas retransmissões para a transferência do "token" e apenas uma retransmissão para a transferência de informação. A estratégia inversa à recomendação das especificações mostra-se mais razoável, para níveis de confiabilidade equivalentes (figura 4.8 para $nr = 2$ e 4.9 para $nr = 1$). Isto é, 2 retransmissões para a transferência de informação e uma retransmissão para a transferência do "token".

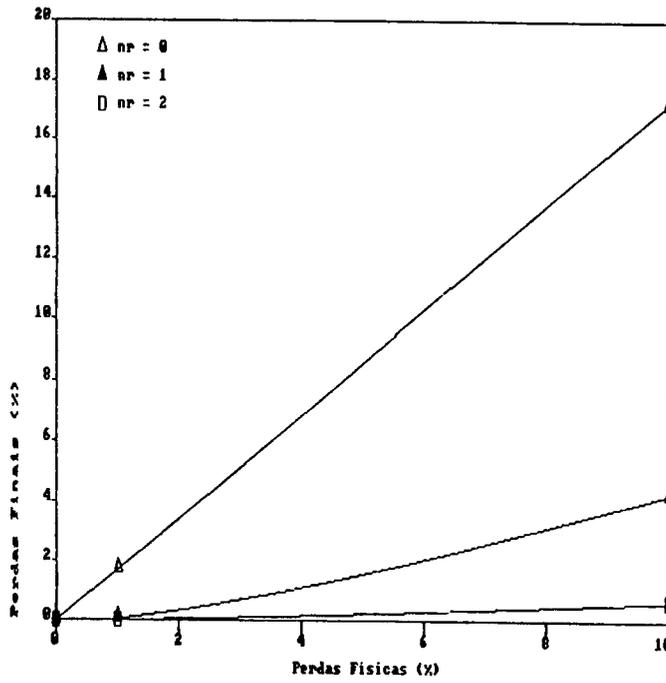


FIGURA 4.8 - PROFIBUS - Gráficos de perdas finais dos serviços SDA, SRD, RDR

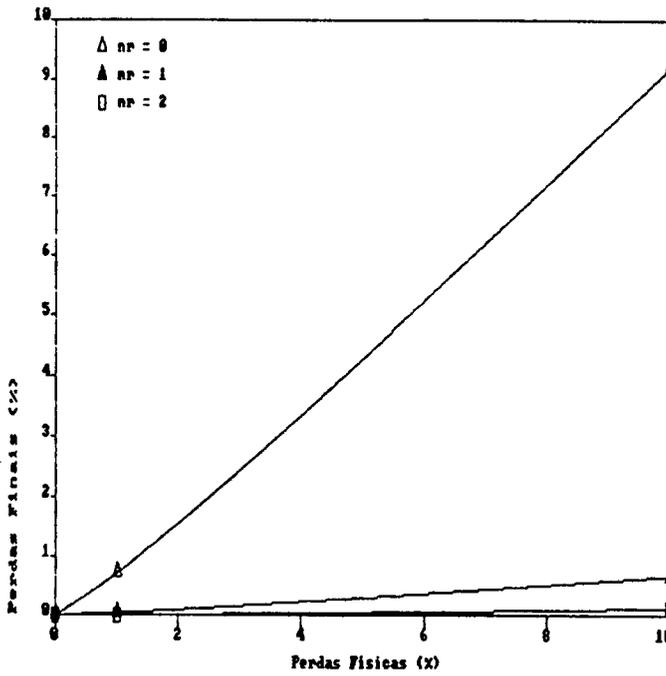


FIGURA 4.7 - PROFIBUS - Gráficos de perdas finais da transferência do "token"

Como $P_f < P_p$, o PROFIBUS reduz a transmissão das perdas físicas.

4.4.2.2 FIP

No FIP, as perdas finais são aquelas observadas pelo árbitro ou pelas entidades ativamente envolvidas na transação (TB).

a. Dados e resultados:

As figuras 4.10 a 4.13 apresentam as curvas de perdas finais dos serviços SDA, TB, SDN e aperiódico, nas distintas condições de simulação.

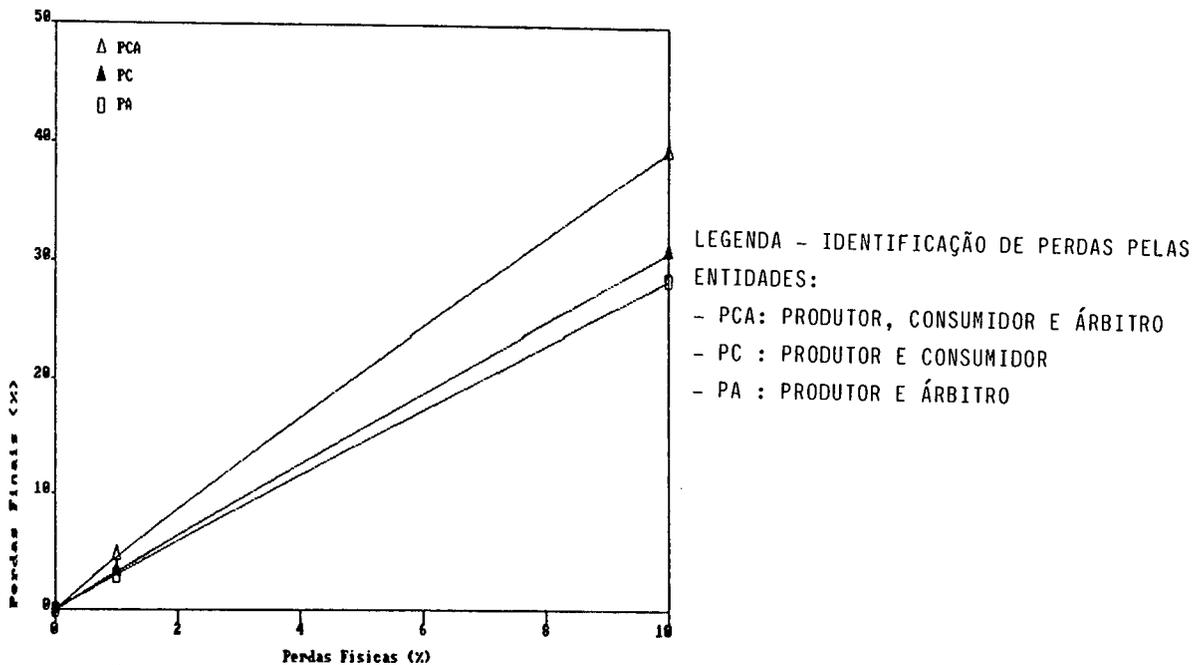


FIGURA 4.10 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço (TB)

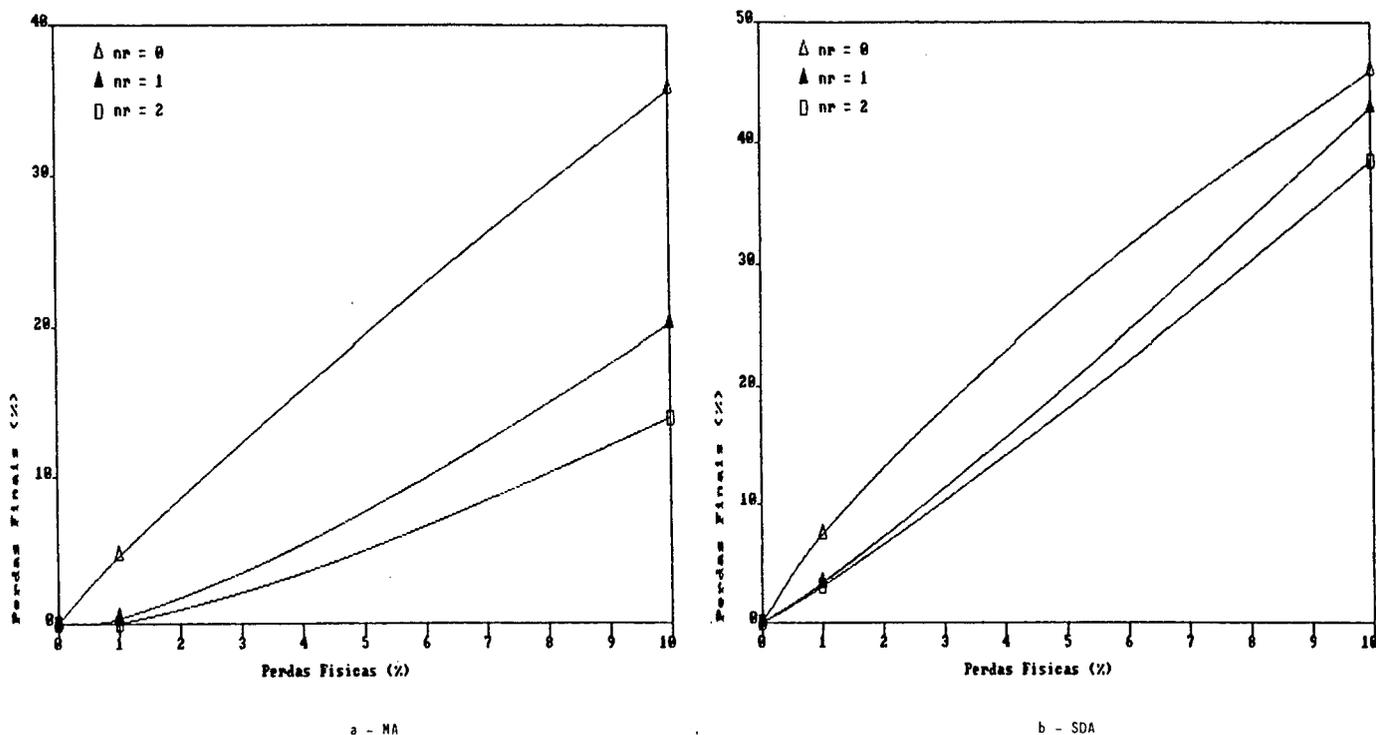


FIGURA 4.11 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço SDA e da sua fase MA.

Na obtenção das perdas finais para os serviços completos (SDA, SDN, UP) das figuras 4.11 a 4.13, multiplicou-se os valores de perdas finais das fases de requisição do serviço (transação TB - curva PA da figura 4.10), pelos valores de perdas finais da fase de efetiva execução do serviço (MA, MN e RETB).

b. Análise individual:

No caso do serviço SDA (fig. 4.11), há um decréscimo médio de 30 a 50 % na transmissão de perdas finais através da

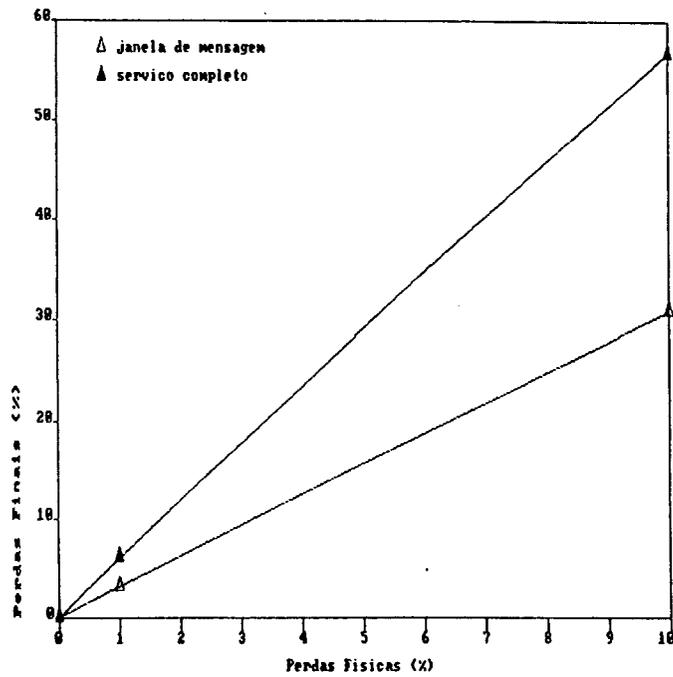


FIGURA 4.12 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço SDN e da sua fase MN

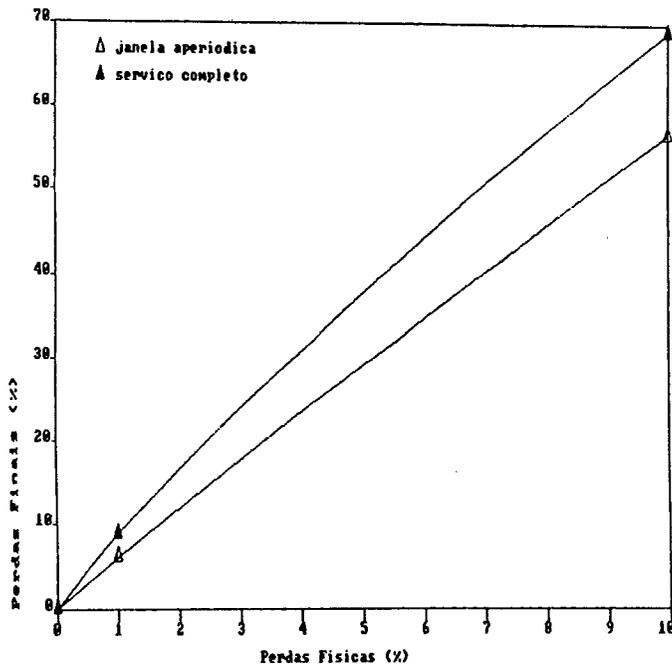


FIGURA 4.13 - FIP - Gráficos de perdas finais do serviço UP e da sua fase RETB

camada enlace, com a inclusão de uma retransmissão, na fase de efetiva transferência de mensagem (MA). Este decréscimo se reduz para cerca de 10 a 20 %, com a inclusão da fase de requisição do serviço do produtor para o árbitro. À partir desta condição, o aumento do número de retransmissões contribui muito pouco para a diminuição das perdas finais, o que demonstra uma certa ineficiência do controle de perdas do serviço SDA e, de certa forma, a inutilidade das retransmissões.

Comparando-se as perdas finais dos diversos serviços do FIP, observa-se que o serviço SDA é o serviço de maior confiabilidade, mas somente com um número muito elevado de retransmissões. Em alguns casos, sua confiabilidade é menor que a de outros serviços sem retransmissão. O serviço de pior confiabilidade é o aperiódico, devido ao seu maior número de interações (3) via barramento sem retransmissões. Como em todas as curvas $P_f > P_m$, o FIP não reduz a transmissão das perdas físicas. Ao contrário, amplifica-as.

4.4.2.3 Análise comparativa

Comparando-se FIP e PROFIBUS, observa-se que o PROFIBUS é sensivelmente mais eficiente que o FIP, no controle das perdas finais (5 a 10 vezes em média). Por exemplo, são necessárias 5 retransmissões no serviço SDA do FIP, se considerada somente a fase de efetiva execução do serviço (MA), para se obter o mesmo nível de confiabilidade do serviço SDA do PROFIBUS, com uma única retransmissão, a 10 % de perdas físicas. Para o serviço SDA completo, a equivalência só é obtida para mais de

10 retransmissões (simulado mas não plotado no gráfico) no FIP, e nenhuma retransmissão no PROFIBUS.

A principal deficiência no controle de perdas do FIP reside na fase de transferência das solicitações do produtor/consumidor para o árbitro (fig. 4.10), decorrente dos controles de acesso ao barramento e do fluxo de informação residirem em entidades distintas, o que gera uma quantidade elevada de interações sem retransmissão, na execução de um serviço.

4.4.3 Eficiência da transferência de informação

A eficiência da camada enlace consiste numa medida percentual do "overhead" (tempo total) necessário para transferência de uma informação útil (do usuário), descrita da seguinte forma:

$$\text{!-----!} \\ \text{!Eficiência (\%) = } \frac{\text{tempo(L_sdu)}}{t_{\text{es}}} \text{ x 100 !} \\ \text{!-----!}$$

onde os valores de t_{es} foram obtidos similarmente ao item 4.4.1.

Os resultados de eficiência, estão estreitamente relacionados com a capacidade de transmissão, sendo que algumas indicações do item 4.4.1 serão corroboradas neste item.

4.4.3.1 PROFIBUS

As curvas descritivas da eficiência dos serviços SDA/RDR, SRD e SDN do PROFIBUS são apresentadas na figura 4.14.

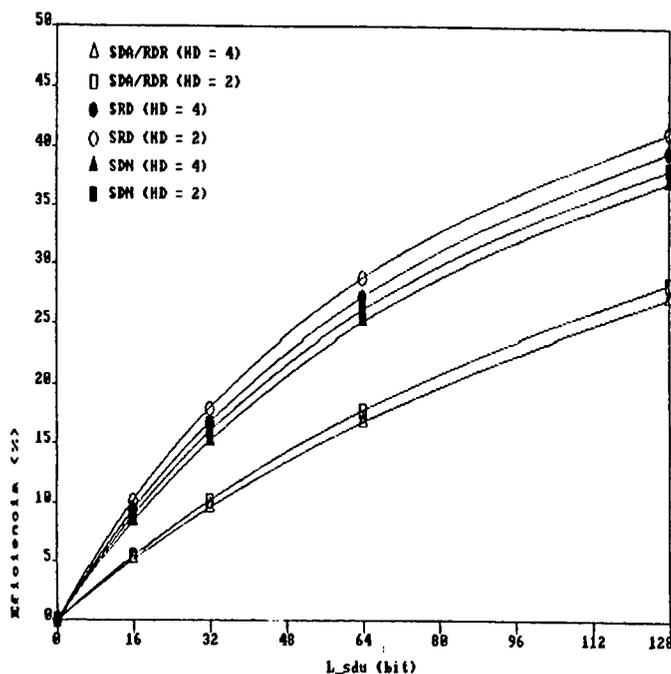


FIGURA 4.14 - PROFIBUS - Gráficos de eficiência dos serviços

4.4.3.2 FIP

a. Dados e resultados:

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam a eficiência dos serviços TB, SDA, SDN (fig. 4.15) e aperiódico (fig. 4.16). As curvas da figura 4.15 (MN/SDN e MA/SDA) apresentam a eficiência dos serviços de mensagem, considerando:

- somente a fase de efetiva execução do serviço;
- o serviço completo, com uma fase de transferência da requisição, através de um serviço TB, com $L_{sdu} = 0$.

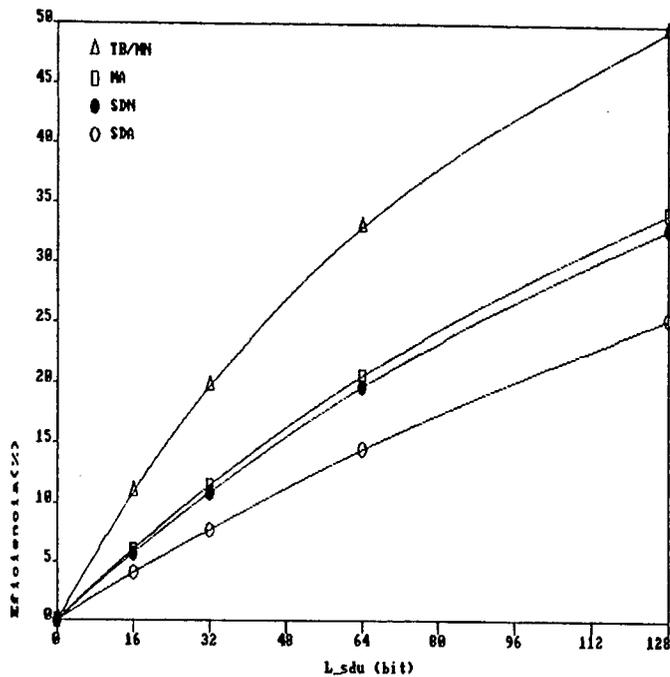
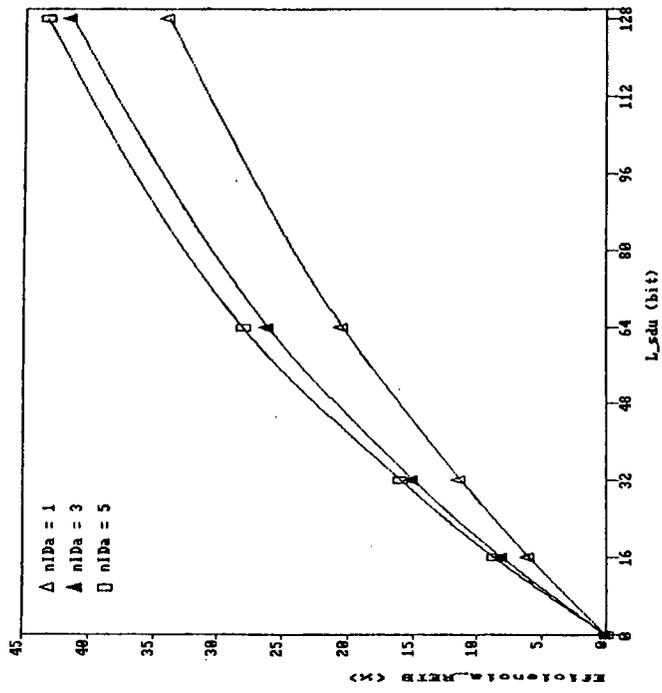


FIGURA 4.15 - FIP - Gráficos de eficiência dos serviços TB, SDN e SDA

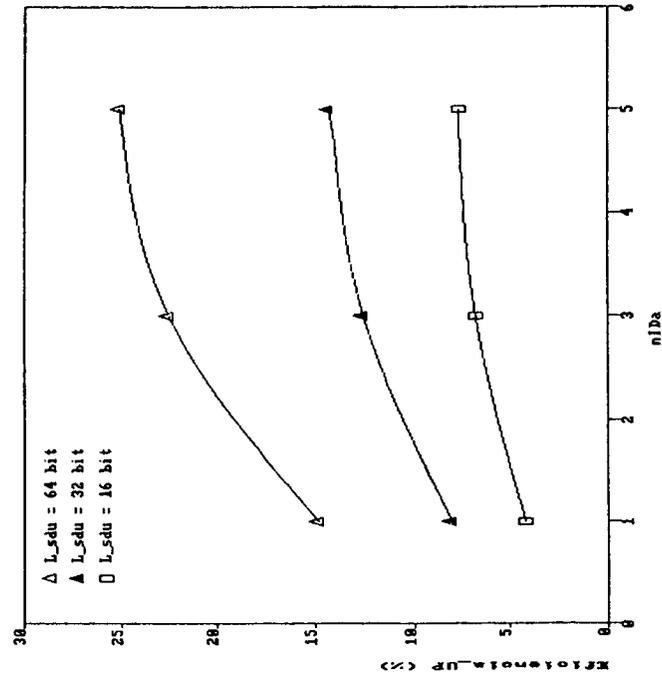
As curvas da figura 4.16 apresentam a eficiência do serviço aperiódico, para nIDa variável, na fase de efetiva execução da transferência de informação e no serviço completo.

b. Análise individual:

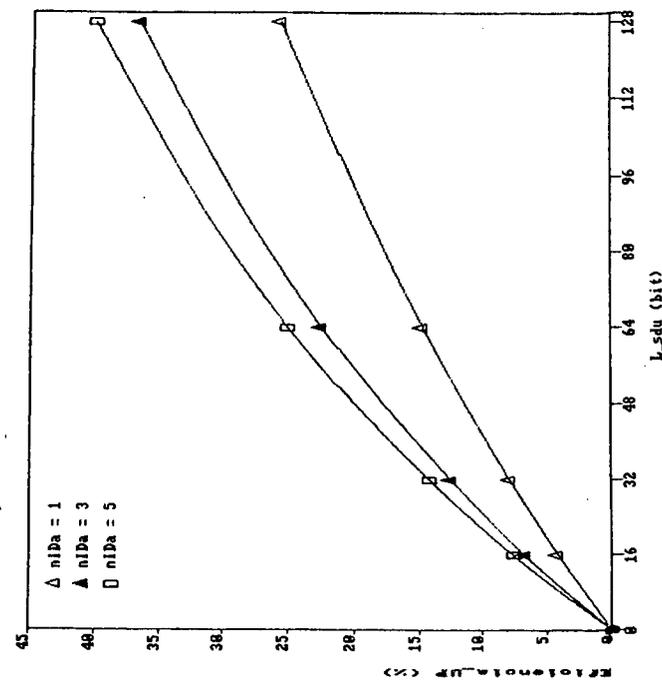
Na figura 4.16, a eficiência para nIDa > 5 aproxima-se da eficiência do serviço TB. Contudo, a eficiência tende a estabilizar-se com o acréscimo de nIDa (fig.4.16.b), para L_sdu's de pequena dimensão. Isto ocorre devido à cada informação adicional a ser transferida implicar num identificador a mais na lista (nIDa), equiparando as variações



a - UP: $E\% = f(L_{sdu})$



b - UP: $E\% = f(nIDa)$



c - RET: $E\% = f(L_{sdu})$

FIGURA 4.16 - FIP - Gráficos de eficiência de serviço UP

no "overhead" e no dado útil, para L_sdu's pequenos (próximos a 16), não implicando ganho em eficiência.

O FIP impõe um decréscimo médio da eficiência (fig. 4.15) de 10 a 40 % (dependendo do serviço) nos serviços aperiódicos e de mensagem, à partir da incorporação da fase de transferência da solicitação dos serviços de produtor/consumidor para o árbitro.

4.4.3.3 Análise comparativa

Comparando-se os resultados do FIP e do PROFIBUS, observa-se que os valores de eficiência são praticamente equivalentes, tendo:

- o FIP os valores máximos e mínimos (TB e SDA, respectivamente);
- o PROFIBUS os valores intermediários;
- a eficiência do FIP fortemente prejudicada pela fase de transferência das solicitações do produtor para o árbitro;
- a eficiência do PROFIBUS limitada pelos tempos internos de reação.

Em termos dos seus serviços mais usuais (TB e RDR/SDA), a eficiência média do FIP é melhor que a do PROFIBUS.

4.4.4 Serviço periódico

4.4.4.1 Tempo de execução do serviço periódico (t_p)

a. PROFIBUS:

a.1 Dados e resultados:

O serviço periódico foi analisado para duas configurações: mono e multi-controlador:

- mono-controlador:

A figura 4.17, apresenta as curvas descritivas de t_p , considerando a execução paralela de serviços aperiódicos concorrentes, em função da taxa com que o usuário local os requisita (t_{LUP}).

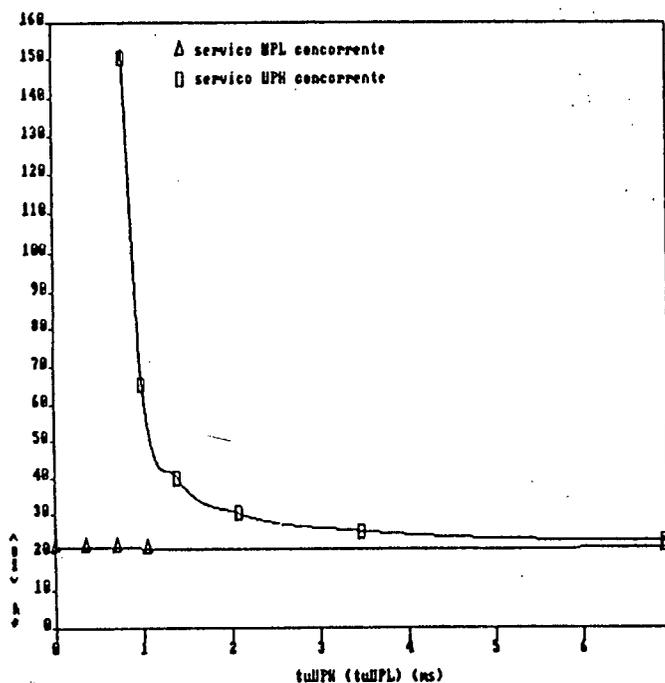


FIGURA 4.17 - PROFIBUS - Gráficos do serviço periódico

- multi-controlador:

Em configurações multi-controlador, a rotação do "token" interfere no serviço periódico, gerando um "overhead" (O_{TRR}), proporcional ao número de mestres envolvidos, conforme a figura 4.18. Neste gráfico não estão incluídos:

- a retirada de estações da Live_list, caso haja insucesso na transferência do "token" para determinada estação;
- a varredura da GAP_list;
- os procedimentos de recuperação de erros, tais como perda e duplicação do "token";
- o tratamento diferenciado, no que tange ao número de tentativas de transferências do "token" ($n_r = 0$), para as estações com as quais as tentativas de transferência anteriores foram mal-sucedidas.

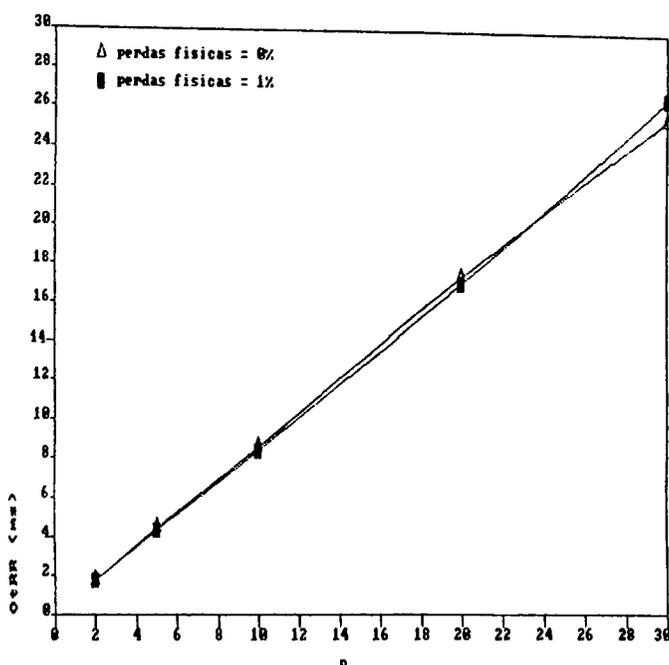


FIGURA 4.18 - PROFIBUS - Gráficos do "overhead" de rotação do "token" - $O_{TRR} = f(n)$

Quanto à aplicação de $0t_{RR}$ sobre t_m , a figura 4.19 apresenta curvas descritivas do tempo de execução serviço periódico (n_m/n) em uma dada estação mestre, em função do instante de sua ativação na referida estação, relativamente ao instante de recepção do "token" ($t_{m,t}$). Isto é, o tempo que a estação dispense em uma varredura da Poll_list, considerando sua restrição de tempo para retenção do "token".

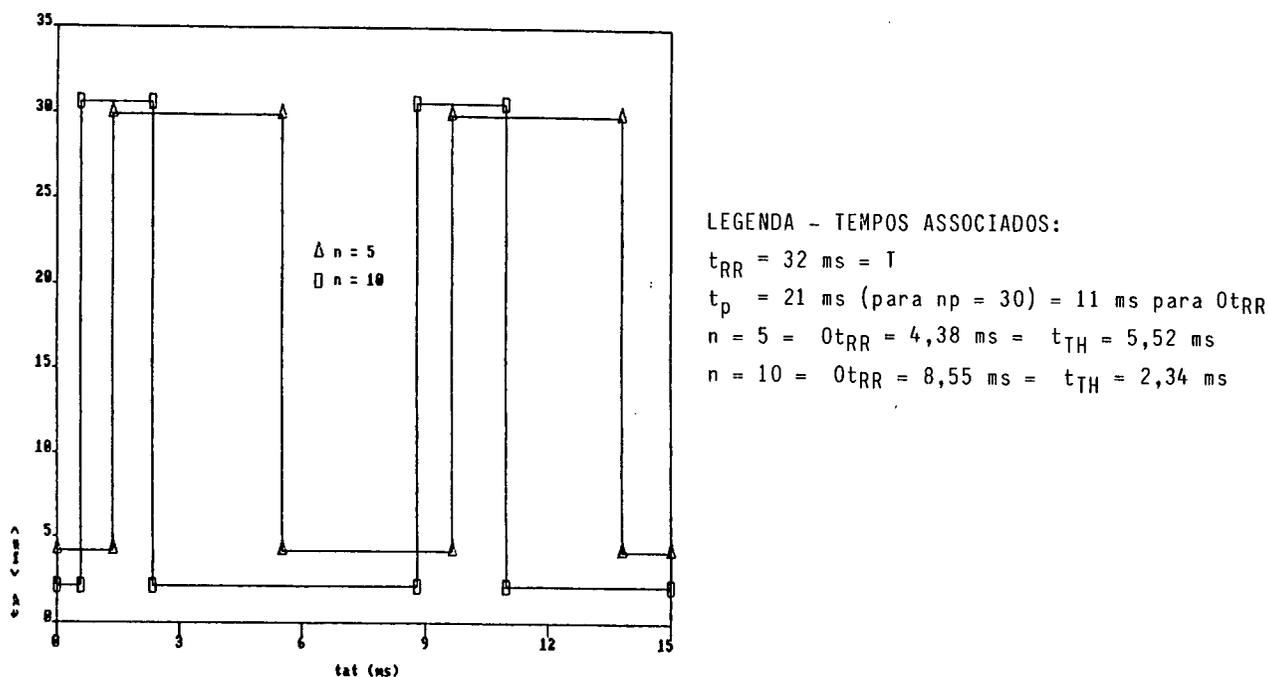


FIGURA 4.19 - PROFIBUS - Gráficos do serviço periódico em função da rotação do "token" - $t_m = f(t_{m,t}, n)$

A medida que $t_{m,t}$ aumenta, o t_{TH} disponível para execução do serviço periódico se reduz, até o ponto em que não é possível concluir uma varredura completa na Poll_list na presente posse do "token". A varredura da Poll_list é, então, suspensa e concluída na posse seguinte, após uma rotação completa do "token".

Os resultados de t_p se referem a um dado controlador pois, no PROFIBUS, os fluxos são independentes por controlador, dificultando a representação do fluxo periódico em todo o PROFIBUS.

a.2 Análise individual:

- mono-controlador:

No PROFIBUS, com o serviço periódico, concorrendo com o serviço aperiódico de baixa prioridade (fig. 4.17), t_p é constante e independente de t_{LUPH} . Concorrendo com o serviço aperiódico de alta prioridade, t_p cresce na proporção inversa da taxa de requisição do serviço aperiódico, tendendo para infinito, quando $t_{LUPH} = t_b$ (contínua solicitação de requisição do serviço aperiódico pelo usuário).

- rotação do "token":

O "overhead" ($O_{t_{FR}}$) cresce linearmente (derivada constante) com o aumento do número de estações (n) - figura 4.18, para 0 % de perdas físicas. Com a inclusão das perdas físicas a derivada da curva aumenta com " n ", e este aumento tende a acentuar-se com a inclusão das operações de manutenção, inicialização e reinicialização do anél lógico.

- multi-controlador:

Na execução do serviço periódico em configurações multi-controlador (fig. 4.19), t_p passa a depender de t_{mt} e a

varredura na Poll_list pode incorporar uma rotação completa do "token" pelo anel lógico.

No caso onde os serviços periódico e aperiódico de alta prioridade estão em concorrência, numa configuração multi-controlador, o intervalo de valores de $t_{m,t}$ em que a execução do serviço periódico é imediata tende a diminuir e os valores de t_p tendem a aumentar, na medida que t_{LUP} diminui, como pode ser observado pela combinação dos resultados das figuras 4.17 e 4.19. Na figura 4.19, a perturbação sobre t_p pode alcançar 1260 % (para $n = 10$) e 512 % (para $n = 5$). Estes resultados demonstram a problemática de sincronização do serviço periódico em configurações com MAC distribuído, como a do PROFIBUS.

Conforme mencionado anteriormente, os resultados obtidos se referem ao comportamento do fluxo periódico de um único controlador. Contudo, à partir destes resultados, pode-se intuir o comportamento médio do tempo total de execução das n_p transações do serviço periódico no PROFIBUS, desconsiderando-se as restrições de sincronização dos tempos $t_{m,t}$ nos distintos controladores e, em decorrência, a falta de consistência na ordem de execução das n_p/n transações periódicas de cada controlador.

Assim, o tempo médio de execução de n_p transações quaisquer (não necessariamente as n_p/n transações de cada controlador em sequência), em uma configuração multi-controlador, é dado por:

$$t_{pm} = t_{p1} (1 + Ot_{RR}/t_{RR} - Ot_{RR})$$

onde:

- t_{p1} é descrito no gráfico da figura 4.17 ($t_{p1} = f(t_{LUPH}, t_{LUPFL})$);
- Ot_{PRR} é descrito no gráfico da figura 4.18 ($Ot_{PRR} = f(n)$).

b. FIP:

A figura 4.20 apresenta o comportamento de t_p em função do número de controladores e da taxa de requisição do serviço aperiódico. Na obtenção dessas curvas foi utilizado o modelo do ciclo elementar completo do FIP e $n_p = 30$. t_p é constante e independente do n , t_{at} , t_{LUP} ou qualquer outra variável, com exceção de n_p .

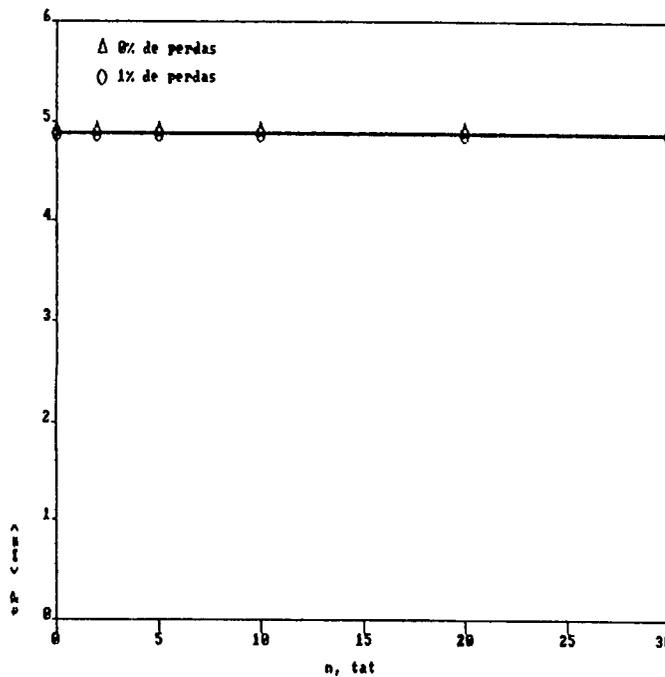


FIGURA 4.20 - FIP - Gráficos do serviço periódico - $t_p = f(n, t_{at}, t_{LUP})$

c. Análise comparativa:

Comparando-se os resultados obtidos para o FIP e PROFIBUS, as consideráveis variações do valor t_p no PROFIBUS, devido à concorrência com o serviço aperiódico e à rotação do "token", dificultam a sua aplicação em configurações cujas tolerâncias, em termos da uniformidade das " n_p " de interações com o processo, extrapolam as restrições indicadas nas figuras 4.17 e 4.19.

A diferença no tempo de execução do serviço periódico (30 transações) do FIP (4,89 ms) e do PROFIBUS (21 ms) é maior que a diferença média de capacidade de transmissão, em favor do FIP.

4.4.4.2 Tempo de reação do sistema (t_{RR})

a. PROFIBUS:

No PROFIBUS, em configurações mono-controlador, t_{RR} é equivalente a t_p (fig. 4.17).

Em configurações multi-controlador, t_{RR} está relacionado com t_{RR} . Contudo, para efeito de comparação com o FIP, t_{RR} não permite associar-se informações de usuário, tais como: n_p , t_{LUP} , n_{UP} , etc., restringindo as possibilidades de caracterização dos fluxos periódico e aperiódico sistêmicos. Desta forma, as configurações relacionadas com t_{RR} não foram estudadas.

Contudo, à partir dos resultados em uma configuração mono-controlador, pode-se ter uma avaliação do comportamento em uma configuração multi-controlador (ver item 4.4.3.1 - a.2).

No caso mono-controlador ($t_{BR} = t_m$), constata-se (fig. 4.17 = pontos em retângulo) a grande sensibilidade de t_{BR} a t_{LUP} .

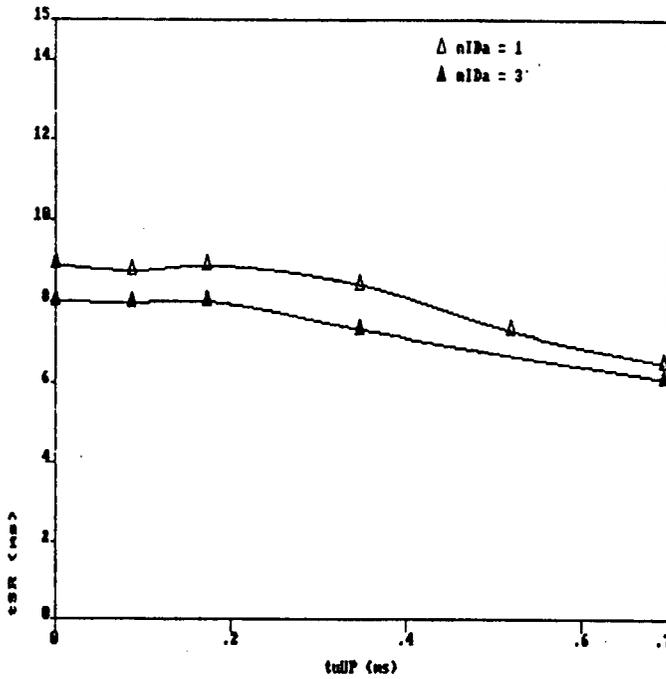
b. FIP:

No FIP, $t_{BR} = t_{CE}$, consistindo no tempo total de execução dos serviços periódico e aperiódicos.

As figuras 4.21 e 4.22 apresentam curvas descritivas de t_{BR} em função da taxa de requisição do serviço aperiódico (t_{LUP}), em diversas condições de operação (n_m , n_{IDa} e macro-ciclo com e sem sincronização).

Nestes resultados é importante observar que:

- t_{BR} é equivalente para os serviços aperiódicos de alta e baixa prioridade;
- os valores de t_{BR} para $n_{IDa} = 1$ são cerca de 1 ms maiores (em média) que para $n_{IDa} = 3$, no ciclo elementar sem sincronização (fig. 4.21), e aproximadamente iguais, no ciclo elementar sincronizado (fig. 4.22);
- t_{BR} ultrapassa o limite de 8 ms na configuração com macro-ciclo sincronizado (fig. 4.22), no mesmo intervalo de t_{LUP} em que dt_{BR} é acentuado, devido ao acúmulo de transações aperiódicas a serem executadas,



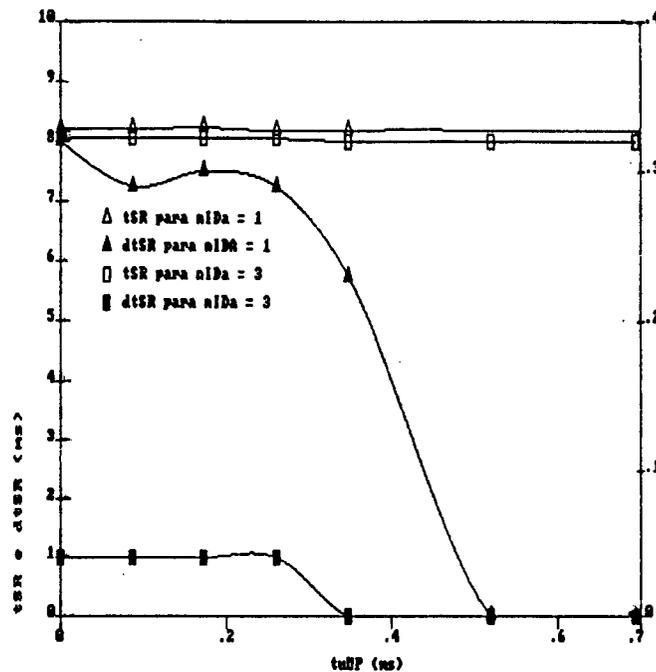
OBSERVAÇÃO: OS VALORES DA ESCALA HORIZONTAL INDICAM A TAXA EQUIVALENTE DE SOLICITAÇÃO DO SERVIÇO APERIÓDICO, CONSIDERANDO QUE A CADA REQUISIÇÃO SÃO TRANSMITIDAS 3 INFORMAÇÕES, PARA $nIDa = 3$ E 1 INFORMAÇÃO, PARA $nIDa = 1$. PARA SE OBTER OS $tuUP$ EFETIVOS TEM-SE:

$tuUP(nIDa = 1) =$ VALORES DA ESCALA

$tuUP(nIDa = 3) =$ VALORES DA ESCALA MULTIPLICADOS POR 3

ESTA CONVERSÃO FOI ADOPTADA PARA FACILITAR A COMPARAÇÃO DAS CURVAS ENTRE SI E COM O PROFIBUS, SENDO VÁLIDA TAMBÉM PARA AS FIGURAS 4.22, 4.25, 4.26 E 4.27

FIGURA 4.21 - FIP - Gráficos do tempo de reação do sistema - $t_{sR} = f(t_{uUP}, nIDa)$ para $n_m = 30$ e macro-ciclo sem sincronização



OBSERVAÇÃO: VER FIGURA 4.21

FIGURA 4.22 - FIP - Gráficos do tempo de reação do sistema - $t_{sR} = f(t_{uUP}, nIDa)$ para $n_m = 30$ e macro-ciclo sincronizado

restringidas pelo tempo $t_{DR} = 8 \text{ ms}$, caracterizando demanda reprimida.

c. Análise comparativa:

Comparando-se os resultados descritos acima, observa-se que a sensibilidade de t_{DR} a t_{LUP} no FIP é bastante menos acentuada que no PROFIBUS. No FIP, o máximo valor de t_{DR} é 188 % de t_p e no PROFIBUS é infinito. Adicionalmente, o FIP admite a contínua solicitação dos serviços aperiódicos a $t_{LUP} = 0$ e no PROFIBUS os valores admitidos são $t_{LUP} > 0,69 \text{ ms}$.

No PROFIBUS, a sensibilidade de t_{DR} a t_{LUPH} é muito alta e a t_{LUPL} é nula. No FIP, a sensibilidade não difere grandemente, quando os serviços de alta e baixa prioridade concorrem individualmente com o serviço periódico (inexistência de prioridade relativa ao serviço periódico).

O PROFIBUS mostra-se seriamente restrito, para aplicação num sistema de controle a instantes regulares de amostragem (T , equivalente a t_{DR}). Para se moderar a influência dessas restrições, é necessário que ele seja aplicado:

- em configurações mono-controlador, com t_{LUPH} elevado e controlável;
- onde o controle de periodicidade seja facilmente executado pelo usuário da camada enlace ou
- em configurações multi-controlador, onde um atraso t_{DR} não seja significativo para os tempos de processo ($O_{t_{DR}}$ pode variar de 1,77 a 25,45 ms - fig. 4.18).

Em contrapartida, o serviço periódico no FIP atende sem restrições aos requisitos de periodicidade mencionados.

4.4.5 Serviço aperiódico

A qualidade do serviço aperiódico será medida através do tempo de acesso ao barramento (t_{AB}). Como a medida quantitativa de t_{AB} depende de um conjunto de condições dinâmicas, estudou-se t_{AB} indiretamente. Mediu-se o tempo total de execução de nUP serviços aperiódicos (t_{UP}), em função das taxas de requisição dos serviços com os quais concorre, e da sua própria taxa de requisição (t_{LUP}). A partir de t_{UP} , obteve-se o valor médio de t_{AB} entre as nUP transações aperiódicas, pela aplicação da equação:

$$t_{AB} = t_{UP}/nUP - t_{LUP} - t_e$$

Genericamente, neste item são estudados dois conjuntos de resultados:

a. t_{AB} em função da taxa com que o serviço é solicitado:

A condição ideal é $t_{AB} = 0$. Ou seja, os serviços são executados na medida em que são solicitados (sem atrasos). Esta condição ideal, adotada como assintota dos demais resultados, é restringida pela não execução instantânea dos serviços. Assim, mesmo sem concorrência com outros serviços, o tempo de execução dos serviços precedentes na entidade local impõe uma "inércia natural" à camada. A esta "inércia natural" são somados os

atrasos decorrentes da concorrência com outros serviços, proporcionais à taxa com que os mesmos são solicitados.

b. t_{AB} em função da taxa de solicitação dos serviços concorrentes:

Este estudo é uma medida do desnível das prioridades de execução dos diferentes serviços na camada enlace, e das perturbações mútuas entre os mesmos.

A condição ideal, do ponto de vista do serviço em execução, é t_{AB} constante, independentemente de t_{AUB} dos serviços concorrentes. Esta condição é "ideal" do ponto de vista do serviço em questão, entretanto impossibilita a execução do serviço concorrente, caracterizando o monopólio do barramento.

4.4.5.1 PROFIBUS

a. Dados e resultados:

No estudo do serviço periódico do PROFIBUS, 3 condições foram analisadas:

- a.1 Serviços aperiódicos de alta e baixa prioridades concorrendo entre si: figura 4.23.a (serviço de baixa prioridade) e 4.23.b (serviço de alta prioridade);
- a.2 Serviços aperiódicos concorrendo com o serviço periódico;

a.3 Serviço aperiódico perturbado pela rotação do "token",
em uma configuração multi-controlador.

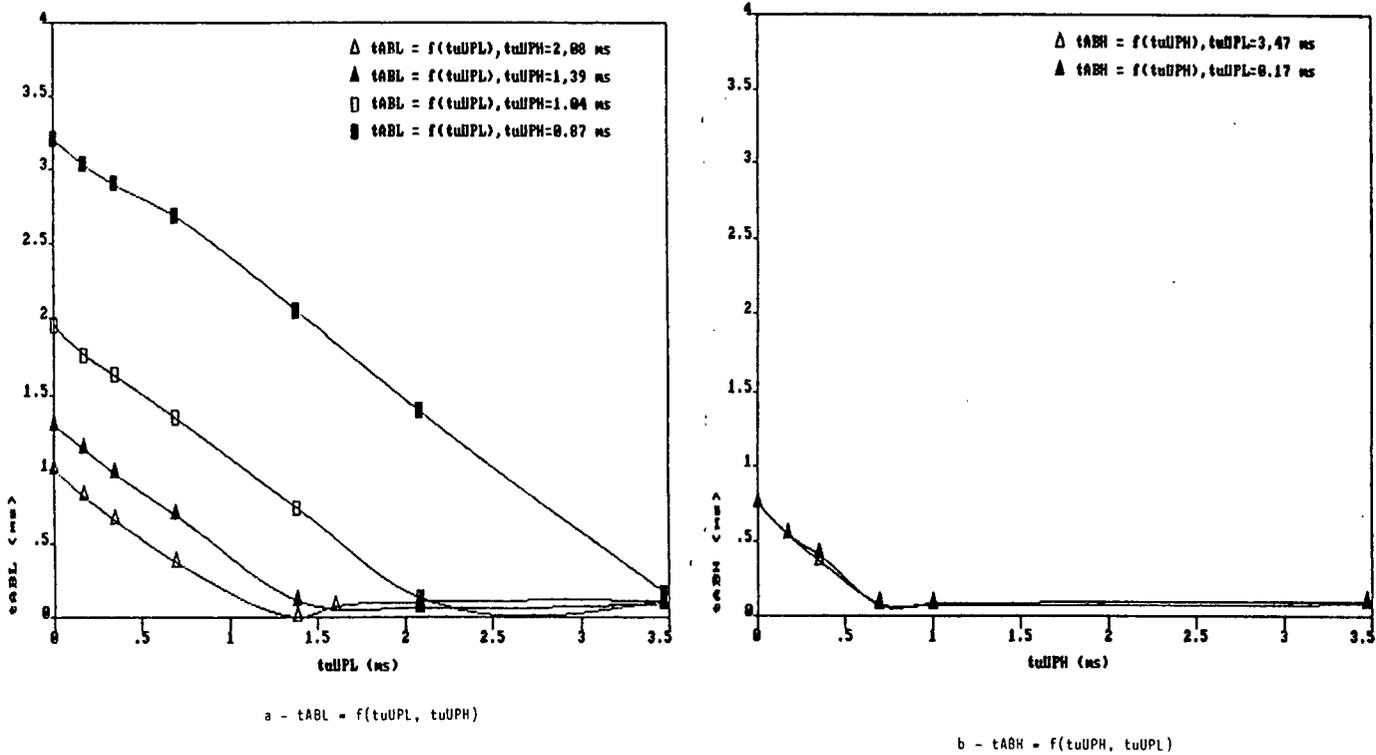


FIGURA 4.23 - PROFIBUS - Gráficos do tempo de acesso
barramento $t_{ABL} = f(tu_{UPH})$ e $t_{ABL} = f(tu_{UPL})$

Para a condição a.3, as curvas da figura 4.24 descrevem o comportamento de t_{ABL} em função de tu_{UPH} , para distintas condições de t_{at} (tempo de início da ativação da execução das nUP transações aperiódicas) e de t_{TH} , em relação à quantidade total de serviços aperiódicos considerados. Este gráfico foi traçado em condições determinadas de operação (t_{at} , t_{TH}), que não são efetivamente controláveis pelo usuário da camada enlace.

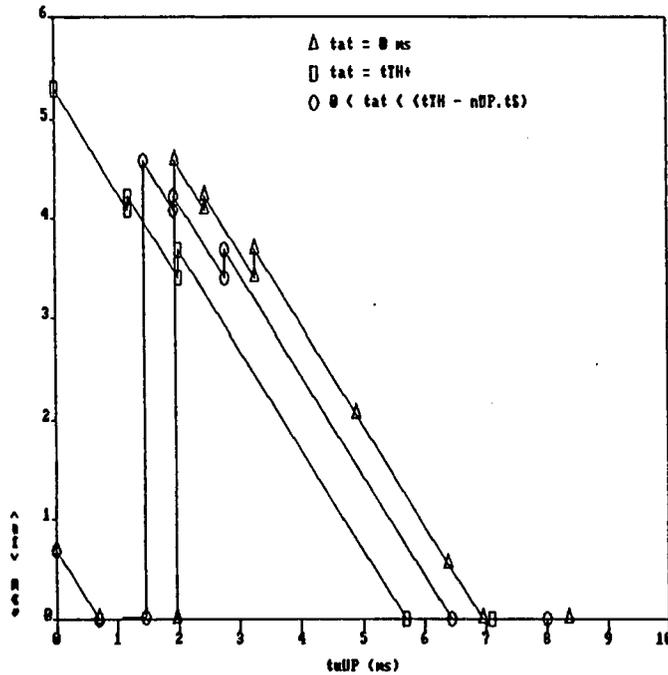


FIGURA 4.24 - PROFIBUS - Gráficos do tempo de acesso ao barramento perturbado pela rotação do "token"

Pode-se intuir os resultados para modelos mais complexos (concorrência com outros serviços aperiódicos e periódico), considerando-se as curvas da figura 4.24 como assíntotas inferiores para esses resultados. Assim, para condições onde, além da rotação do "token", há a concorrência com outros serviços, as curvas de t_{AEB} resultantes são dadas pela soma das curvas das figuras 4.23.a e 4.24.

b. Análise individual:

b.1 Serviços aperiódicos concorrendo entre si:

Nos gráficos da figura 4.23 (configuração mono-controlador) observa-se o aumento de t_{AEB} (fig. 4.23.a),

contrariamente a t_{ABH} (fig. 4.23.b), na medida que a taxa de requisição do serviço concorrente ($1/t_{LUP}$) aumenta. Em contrapartida, nas regiões das curvas para pequena taxa de requisição, t_{AB} é praticamente nulo e os efeitos da concorrência entre os serviços não são perceptíveis.

b.2 Serviço aperiódico e periódico concorrentes:

O comportamento de t_{ABH} não se altera com a concorrência com o serviço periódico. t_{ABL} , ao contrário, tende para o infinito.

b.3 Serviço aperiódico e a rotação do "token":

Para se ter uma idéia do nível de perturbação da rotação do "token", o comportamento da curva para $t_{ABE} = t_{TH}$ (fig. 4.24) é equivalente ao gráfico t_{ABL} numa condição de elevada concorrência entre os serviços, representada na figura 4.23.a.

4.4.5.2 FIP

a. Dados e resultados:

As figuras 4.25 a 4.32 apresentam t_{AB} em função de t_{LUPH} , t_{LUPL} , n_P , n_{IDA} e t_{CE} , nas distintas condições de simulação. Na obtenção dessas curvas foi utilizado o modelo do ciclo elementar.

O estudo do primeiro conjunto de resultados (item 4.4.5.a) envolveu a análise de 2 condições:

a.1 o comportamento do serviço aperiódico sem concorrência com outros serviços para três condições de n_p (fig. 4.25 a 4.28);

a.2 o comportamento dos serviços aperiódicos de alta e baixa prioridades, concorrendo entre si (fig. 4.29 a 4.32).

b. Análise individual:

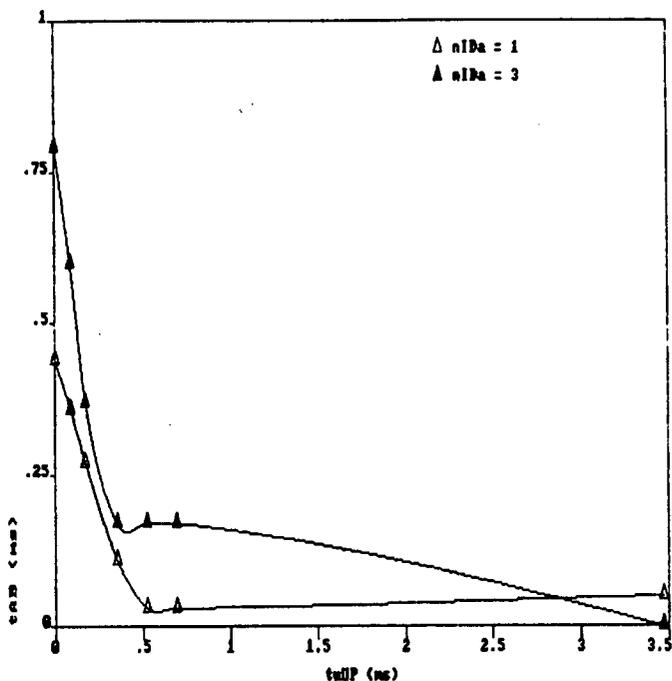
b.1 Serviço aperiódico sem concorrência (condição a.1):

Constata-se, para as mesmas condições de fluxo de informação ($n_{IDa}.n_{UP}$), que o atraso na execução dos serviços é menor para $n_{IDa} = 3$, que para $n_{IDa} = 1$, por permitir a transferência de um volume maior de informação, para um mesmo número de interações via barramento.

A medida que n_p aumenta (fig. 4.28), há um acréscimo em t_{AB} . Este acréscimo é mais acentuado para valores pequenos de t_{LUF} . Para valores grandes, a influência de n_p sobre as variações em t_{AB} decresce sensivelmente, tornando-se praticamente nula.

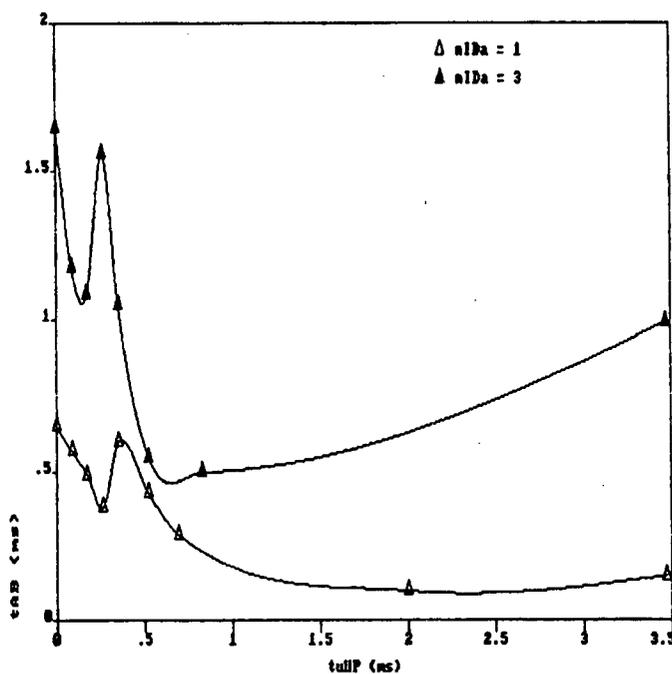
O comportamento de t_{AB} retrata a concorrência com os serviços aperiódicos, precedentemente solicitados, e com os intervalos de execução do serviço periódico.

O comportamento de t_{AB} na região não nula pode modificar-se largamente, em função de condições aleatórias de operação, tal como a diferença de fase entre os instante das requisições do serviço aperiódico e o início da execução do serviço periódico, que é tão mais significativa quanto menor for t_{LUF} e maior for n_p . A influência desta diferença de fase



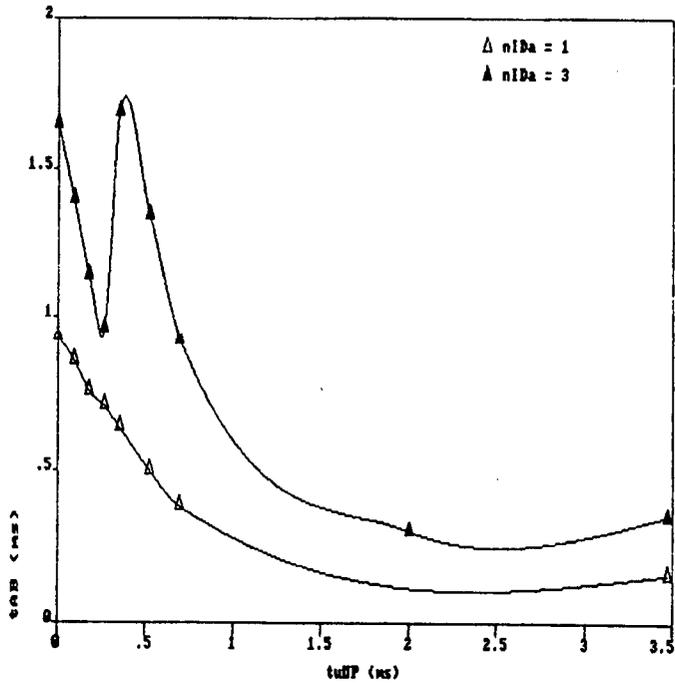
OBSERVAÇÃO: VER FIGURA 4.21

FIGURA 4.25 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento - $t_{AB} = f(t_{LUP}, nIDa)$ para $n_{IDa} = 1$ e macro-ciclo sem sincronização



OBSERVAÇÃO: VER FIGURA 4.21

FIGURA 4.26 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento - $t_{AB} = f(t_{LUP}, nIDa)$ para $n_{IDa} = 30$ e macro-ciclo sem sincronização



OBSERVAÇÃO: VER FIGURA 4.21

FIGURA 4.27 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento - $t_{AB} = f(t_{uAP}, nIDa)$ para $n_{ps} = 30$ e macro-ciclo sincronizado

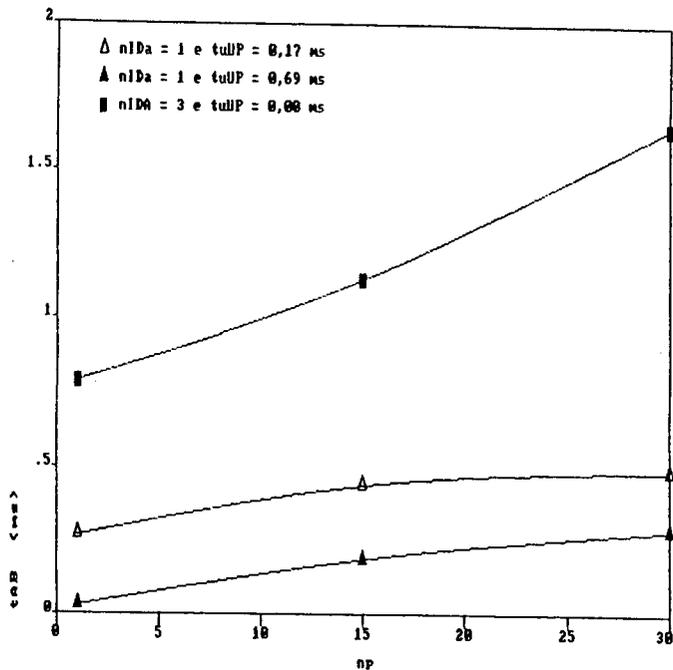


FIGURA 4.28 - FIP - Gráficos dos serviços periódico e aperiódico concorrentes - $t_{AB} = f(n_p)$ (macro-ciclo sem sincronização)

sobre t_{AB} pode ser observada nas oscilações das curvas (fig. 4.25 a 4.27), que retratam uma determinada condição de diferença de fase.

b.2 Serviços aperiódicos concorrentes:

Comparando-se os gráficos das figuras 4.29/31 e 4.26, observa-se que a concorrência incrementa o atraso na execução dos serviços aperiódicos de alta e baixa prioridades, sendo o incremento ligeiramente mais acentuado no serviço de baixa prioridade, para o macro-ciclo sem sincronização. Contudo, para o macro-ciclo sincronizado, os resultados sem (fig. 4.27) e com concorrência (fig. 4.30 e 4.32), diferem mais acentuadamente: no serviço de alta prioridade (fig. 4.30), a concorrência elimina as variações drásticas na curva; no serviço de baixa prioridade, os atrasos crescem de um fator 10 (fig. 4.32).

A perturbação mútua entre os serviços de alta e baixa prioridades é equivalente, para o macro-ciclo sem sincronização (fig. 4.29 e 4.31), o que indica que a concorrência entre os serviços é pouco acentuada. Para o macro-ciclo sincronizado (fig. 4.30 e 4.32), t_{ABL} é fortemente dependente de t_{LUPH} e t_{ABH} é insensível a t_{LUPH} , o que indica que a concorrência é muito acentuada, provocando atrasos consideráveis nos tempos de execução dos serviços de baixa prioridade.

Adicionalmente, os resultados são similares para configurações mono-controladores e multi-controladores, e são independentes do instante de início da ativação do serviço aperiódico.

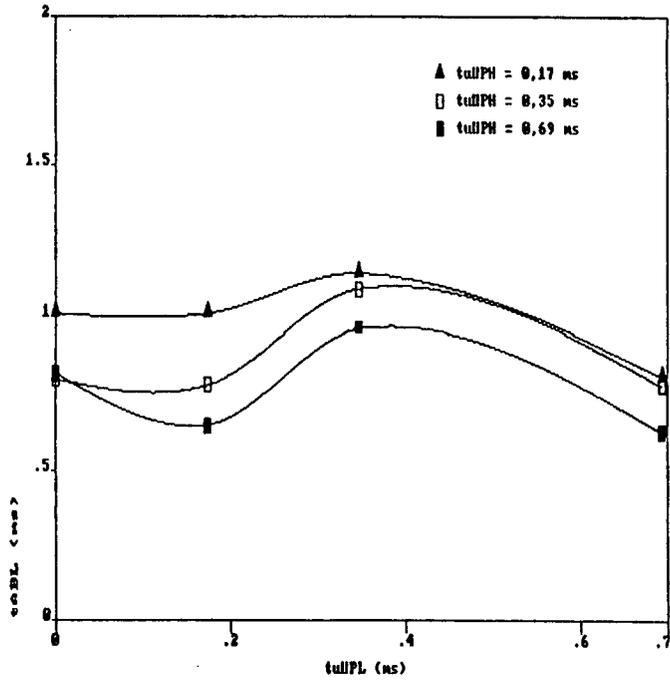


FIGURA 4.29 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento - $t_{ABL} = f(t_{AUPL}, t_{AUPL})$ para $n_{pb} = 30$ e macro-ciclo -sem sincronização

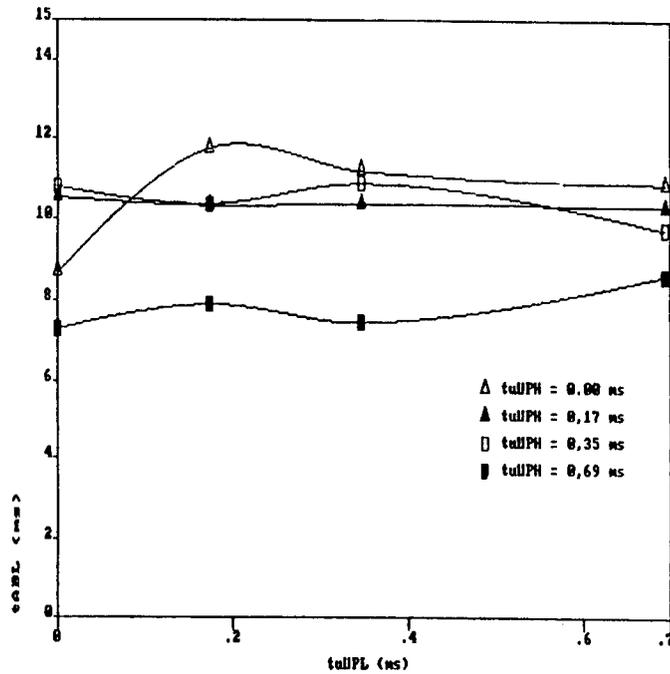


FIGURA 4.30 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento - $t_{ABL} = f(t_{AUPL}, t_{AUPL})$ para $n_{pb} = 30$ e macro-ciclo sincronizado ($t_{CE} = 8$ ns)

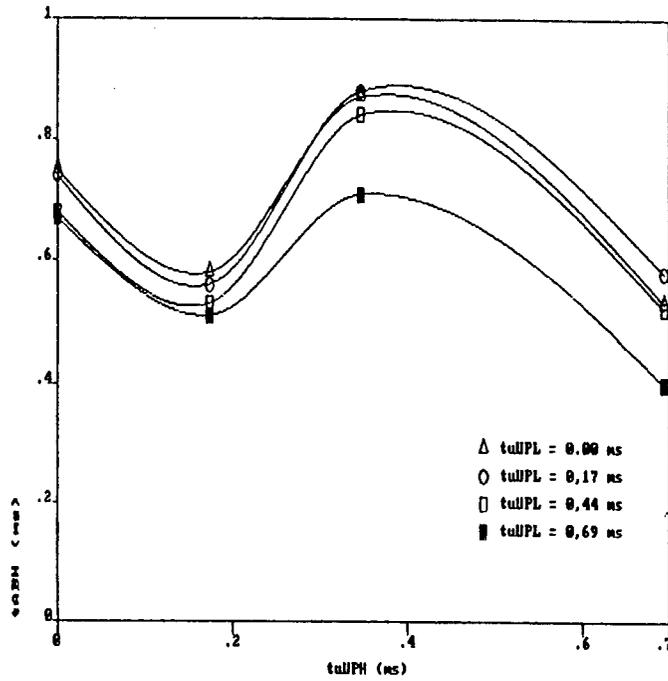


FIGURA 4.31 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 $t_{uDPL} = f(t_{uDPL}, t_{uDPL})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo sem sincronização

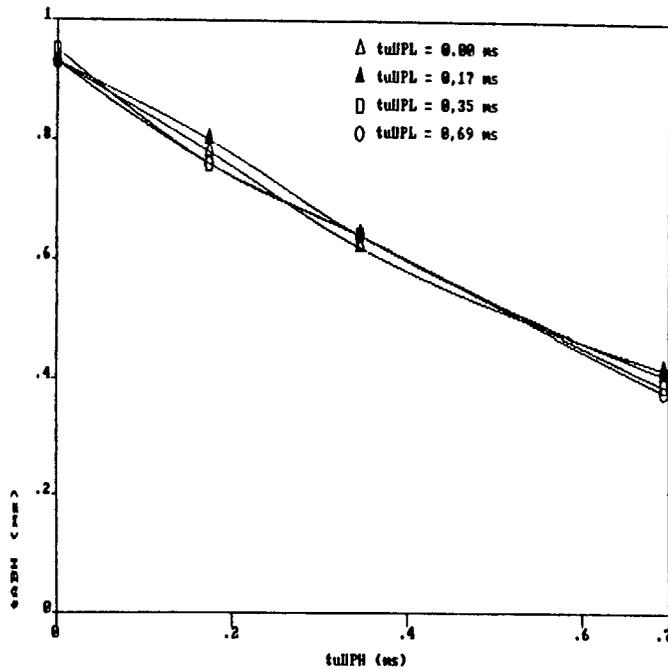


FIGURA 4.32 - FIP - Gráficos do tempo de acesso ao barramento
 $t_{uDPL} = f(t_{uDPL}, t_{uDPL})$ para $n_p = 30$ e macro-ciclo sincronizado ($t_{cic} = 8$ ms)

4.4.5.3 Análise comparativa

Comparando-se os resultados do FIP e do PROFIBUS, para uma situação de não concorrência entre os serviços aperiódicos, observa-se que os resultados do PROFIBUS (fig. 4.23.b) e do FIP (fig. 4.26) se aproximam, principalmente para o macro-ciclo sem sincronização. A capacidade de transmissão dos serviços do FIP é compensada pelo "overhead" da janela periódica, fazendo com que os resultados do PROFIBUS que mais se aproximam do comportamento ideal tornem-se equivalentes aos resultados do FIP.

No caso da incorporação da concorrência, a interferência mútua entre os serviços é mais acentuada no PROFIBUS que no FIP (principalmente no macro-ciclo sem sincronização), como pode ser observado comparando-se a figura 4.23.a com as figuras 4.29 a 4.30.

Esta diferença, de nível de atuação de interferência relativa entre os serviços ocorre em função da definição da prioridade no FIP ser sistêmica (centralizada no árbitro do barramento) e no PROFIBUS ser local, em cada controlador. Como a transferência das solicitações (do produtor/consumidor) ocorre somente na janela periódica, a organização das filas de prioridades no árbitro é feita uma vez a cada ciclo elementar. Este atraso entre a ocorrência de uma solicitação no produtor/consumidor e o seu enfileiramento e prioritização no árbitro é o que permite que uma transação de baixa prioridade possa ser executada antes de uma transação de alta prioridade,

que tem sido solicitada no produtor/consumidor. Esta condição é moderada pela limitação no macro-ciclo sincronizado.

No PROFIBUS, dado que a requisição e a organização das filas é local, não existe o atraso entre essas ações e a diferença de prioridade é bastante mais acentuada (mono-controlador).

Este comportamento no FIP é similar para a condição de inclusão do serviço periódico.

No PROFIBUS, em contra-partida, a contínua execução do serviço periódico inviabiliza a execução do serviço aperiódico de baixa prioridade e é fortemente perturbada pela execução do serviço aperiódico de alta prioridade.

4.5 ANÁLISE COMPARATIVA GERAL

4.5.1 Síntese dos resultados de desempenho

Como uma compilação das informações levantadas da análise do item 4.4, os principais resultados para cada elemento de desempenho são os seguintes.

4.5.1.1 Capacidade de transmissão (Q_u)

A capacidade de transmissão do FIP (fig. 4.7) é 1,5 a 4 vezes maior que a do PROFIBUS (fig. 4.6), dependendo de serviço e das suas condições de execução (fases consideradas, nIDa em UP, etc.). Esta diferença é mais acentuada nas transações do serviço periódico, diminuindo nos serviços aperiódicos e de

mensagem. Comparando-se os melhores resultados de cada proposta, o FIP é 2 vezes mais rápido que o PROFIBUS.

A diferença de capacidade de transmissão entre os serviços periódico, aperiódico e de mensagem é mais acentuada no FIP que no PROFIBUS, que apresenta capacidades de transmissão mais homogêneas.

O PROFIBUS não atende a todos os requisitos de desempenho dos órgãos avaliadores (fig. 2.8). O FIP atende a todos os requisitos, inclusive os de mais alto desempenho, das aplicações em Automação da Manufatura (NEMA, serviço TB).

O que restringe Q_u no PROFIBUS, comparativamente ao FIP é a sua taxa de transmissão (f : metade da do FIP) e os seus tempos internos (muito altos). A segunda restrição é visível na inutilidade da perda de integridade com a adoção de $H_D = 2$ para H_2 (fig. 4.6), com o intuito de se melhorar Q_u . Para que o PROFIBUS e o FIP tenham Q_u equivalentes, é necessário, além de duplicar " f " no PROFIBUS, otimizar sensivelmente a sua implementação da camada enlace, através de uma arquitetura mais eficiente que a tipo "B". É possível que isto só seja viável através da integração das funções atualmente implementadas em "software", em um circuito VLSI.

O que limita Q_u nos serviços aperiódicos e de mensagem do FIP são as interações prévias à efetiva transferência da informação, entre árbitro e produtor/consumidor, expressas pelas diferenças nos resultados (fig. 4.7) entre: RETB e UP, MA e SDA, NM e SDN.

4.5.1.2 Perdas finais (P_f)

A capacidade do PROFIBUS de reduzir o efeito das perdas físicas (fig. 4.8 e 4.9), observáveis através das perdas finais da camada enlace, é maior que a do FIP (fig. 4.10 a 4.13), mesmo para o seu serviço SDA. No serviço SDA, o FIP (fig. 4.11) necessita de um número de retransmissões 5 a 10 vezes maior que o PROFIBUS (fig. 4.8) para alcançar um mesmo valor de perdas finais, para uma dada condição de perdas físicas.

Esta ineficiência do serviço SDA do FIP, torna questionável a sua utilidade, mesmo havendo serviços que apresentem confiabilidade ainda pior (serviço aperiódico - fig. 4.13).

De maneira geral, o FIP não dispõe de mecanismos que reduzam o percentual de perdas físicas, refletido em P_f . Ao contrário, P_p é amplificado em P_f .

No PROFIBUS a redução de P_p em P_f é considerável. Contudo, as especificações [SIEM88] apresentam uma certa disparidade na indicação do número de retransmissões (n_r) necessárias para os serviços de transferência de informação ($n_r = 1$) e transferência do "token" ($n_r = 2$). Os valores invertidos mostram-se mais adequados, para níveis de P_f equivalentes (fig. 4.8 e 4.9).

4.5.1.3 Eficiência da transferência de informação (E_X)

As eficiências da transferência de informação no FIP (fig. 4.15 e 4.16) e no PROFIBUS (fig. 4.14) são equivalentes, principalmente para os serviços aperiódico e de mensagem, a despeito das diferenças em termos de capacidade de transmissão.

Esta equivalência é devido à queda de eficiência dos serviços aperiódico e de mensagem (10 a 40 %) do FIP, quando se considera a fase de transferência da solicitação do produtor para o árbitro. Em contra-partida, a limitação na eficiência do PROFIBUS deve-se aos seus tempos internos.

Adicionalmente, E% do serviço aperiódico do FIP é variável com $nIDa$, mas seu crescimento é limitado, para L_{sdu} 's pequenos.

No PROFIBUS, os serviços de menor eficiência (SDA e RDR) são em geral os mais utilizados, contrariamente ao FIP (TB), o que torna o FIP, em média, mais eficiente que o PROFIBUS.

4.5.1.4 Serviço periódico

t_p e t_{ERR} no PROFIBUS (fig. 4.17 e 4.19) variam grandemente com "n", t_{mt} , t_{LUP} e com a configuração em questão, apresentando dificuldade de caracterização para configurações multi-controlador (sincronização dos controladores).

t_p no FIP é constante (fig. 4.20). t_{ERR} é independente de "n" e varia moderadamente (100 %) com $nIDa$ e t_{LUP} , para o macro-ciclo sem sincronização (fig. 4.21), sendo constante no macro-ciclo sincronizado (fig. 4.22).

O mecanismo de execução do serviço periódico do FIP é sensivelmente mais eficiente que o do PROFIBUS, tanto no que se refere à uniformidade do tempo de execução (t_p), quanto à periodicidade com que o serviço é executado (t_{ERR}).

As principais restrições no PROFIBUS, devem-se: à sua camada enlace não incorporar o controle da distribuição do tempo útil para a utilização do barramento entre os serviços

periódico, aperiódico e de mensagem, como no FIP, e ao "overhead" de rotação do "token".

Esses resultados mostram o compromisso característico entre o MAC distribuído e centralizado. A centralização do controle do árbitro, no caso do FIP, permite se garantir não somente o valor t_p , mas sua periodicidade de ocorrência (t_{BR}), o que não é possível no PROFIBUS. Contudo, a centralização do controle, gera o "overhead" de transferência das requisições entre produtor e árbitro, com repercussões sobre as perdas finais e sobre a eficiência da camada enlace, discutidos nos itens anteriores.

Este compromisso é o ponto nevrálgico de decisão entre MAC distribuído e centralizado.

4.5.1.5 Serviço aperiódico

Para se comparar os tempos de acesso ao barramento (t_{AB}) é necessário individualizá-los por suas prioridades: alta (t_{ABH}) e baixa (t_{ABL}).

No PROFIBUS, t_{ABL} varia grandemente com n_p , "n", e com nível de concorrência entre os serviços aperiódicos e periódico. t_{ABH} , em contra-partida, sofre somente a perturbação da rotação do "token". As variações em t_{ABL} podem ser infinitas e em t_{ABH} (em função de "n") podem ser equivalentes a t_{ABL} nos casos de elevada concorrência com outros serviços, mas são mínimas, quando em função de t_{LUP} .

No FIP, t_{AB} varia moderadamente com n_{IDA} e n_p ; depende da sincronização com os instantes de execução da janela periódica e é insensível a "n".

Em termos de valores nominais, t_{ABH} no FIP é praticamente equivalente a t_{ABH} no PROFIBUS, diferenciando-se somente no seu comportamento oscilante, em função da sincronização com a janela periódica, no macro-ciclo sem sincronização. No macro-ciclo sincronizado a similaridade é completa. Relativamente a Q_u , t_{AB} no PROFIBUS é melhor que no FIP.

Em termos da perturbação mútua entre os serviços, para um baixo nível de concorrência entre os serviços aperiódicos, t_{ABL} é menor no PROFIBUS que no FIP, devido à execução intercalada com a janela periódica. Para um alto nível de concorrência entre os serviços aperiódicos, em contrapartida, t_{ABL} não varia grandemente em relação à condição anterior no FIP e tende para o infinito no PROFIBUS.

Por não existir concorrência entre os serviços aperiódico e periódico no FIP, o efeito de serviço periódico sobre t_{AB} só é percebido para altas taxas de solicitação dos serviços aperiódicos. No PROFIBUS, contrariamente, a concorrência situa o serviço periódico em um nível de prioridade intermediário entre os serviços de alta e baixa prioridades, gerando uma forte interação entre eles para qualquer t_{LUP} .

Considerando o nível de atuação das prioridades entre os serviços aperiódicos do PROFIBUS e do FIP, em termos de desempenho comparativo (t_{AB}), o usuário dos serviços aperiódicos de alta prioridade do FIP ou do PROFIBUS (em configuração mono-controlador), utilizaria um serviço quase ideal, tendo-o como de alta qualidade. Se utilizasse o serviço de baixa prioridade do PROFIBUS, tê-lo-ia como de baixa qualidade. O mesmo usuário no FIP, situaria o serviço de baixa

prioridade em uma condição intermediária. Em uma configuração multi-controlador, t_{AB} no FIP se aproxima mais da condição ideal.

O nível de interferência entre solicitações dos serviços aperiódicos de alta e baixa prioridades é bastante acentuado no PROFIBUS, contudo, é confinado ao controlador. Isto é, inexistente uma resolução de prioridade sistêmica para todo o PROFIBUS.

No FIP, contrariamente, o nível de interferência entre as solicitações é menos acentuado, devido ao atraso entre a sua ocorrência e a sua resolução de prioridade. Assim, o que se perde em termos de nível de prioridade por este atraso, ganha-se com a sua resolução sistêmica.

Este é mais um compromisso, decorrente das distintas filosofias de implementação adotadas no FIP e no PROFIBUS.

4.5.1.6 Comparação geral

Dessas considerações resumidas e das indicações dos itens anteriores, observa-se que nem PROFIBUS nem FIP apresentam uma solução ótima para todos os aspectos analisados. Ambas as propostas apresentam pontos positivos e restrições. Se no FIP os pontos positivos são a capacidade de transmissão e o serviço periódico, no PROFIBUS são as perdas finais e o serviço aperiódico (relativamente a Q_u). A média das eficiências dos serviços são praticamente equivalentes.

Quanto ao serviço aperiódico, a efetiva superioridade de uma proposta em relação a outra depende da organização adotada para os fluxos de informação (fig. 3.1).

4.5.2 Relação com o modelo de desempenho

Analisando-se as restrições observadas no PROFIBUS e no FIP sob um enfoque genérico, a luz do modelo da figura 3.1, observa-se que existe uma relação estreita com as características adotadas na implementação de cada proposta, no que tange à estratégia de (item 3.5.2.3):

- definição dos fluxos de informação: sistêmico ou por controlador;
- distribuição da ocupação da camada enlace pelos serviços: fixa ou por prioridades;
- resolução de prioridades;
- definição do serviço periódico;
- associação das classes de serviços aos serviços elementares.

a. Definição do fluxo de informação:

O fluxo de informação sistêmico, como no FIP, só é viável em configurações onde um elemento central (árbitro) tem o controle de execução de todos os serviços. O fluxo sistêmico é bastante apropriado em aplicações onde as tarefas de cada controlador são estreitamente interrelacionadas.

Contudo, para os fluxos aperiódico e de mensagem, cujo controle de solicitação (mas não de execução) se dá nos controladores, há necessidade de interações via barramento para a transferência das solicitações ("overhead"), para o árbitro executá-las. Esta condição é tão mais expressiva quanto maior

for a individualização e independência dos fluxos em cada controlador.

No fluxo por controlador, como no PROFIBUS, o controle de execução dos serviços é distribuído entre os controladores. Com isso, não há o "overhead" característico do fluxo sistêmico, para a transferência das solicitações dos controladores, mas há um enfraquecimento do acoplamento entre os controladores.

b. Distribuição da ocupação da camada enlace:

A distribuição fixa, através da divisão da banda disponível em intervalos determinados (janelas) para execução de cada tipo de serviço, adotada pelo FIP, permite o projeto temporal detalhado das interações com o processo. Esta distribuição permite a separação dos serviços, garantindo t_p (fig. 4.20) no serviço periódico, mas estendendo t_{AB} (fig. 4.26 e 4.27).

A distribuição livre, por prioridades, adotada pelo PROFIBUS, flexibiliza a configuração do barramento, em função de variações no comportamento dos fluxos de informação. Contudo, o que se ganha em flexibilidade e tempo de resposta (t_{AB} - fig. 4.23.b), perde-se em periodicidade e uniformidade, nas interações do serviço periódico (t_p - fig. 4.17 e 4.19).

c. Resolução de prioridade:

Em termos da sua abrangência, a resolução de prioridade está estreitamente relacionada com a definição do fluxo de

informação (item "a"), podendo ser sistêmica, atuando sobre as solicitações de todos os controladores, como no FIP, ou a nível de cada controlador, atuando somente sobre as solicitações locais, como no PROFIBUS.

No caso sistêmico é possível priorizar a execução de todos os serviços. Contudo, isto reduz a prioridade local e impõe o "overhead" característico do fluxo sistêmico, extendendo t_{AB} (fig. 4.26 e 4.27).

No caso por controlador, a prioridade local é preservada (t_{AB} reduzidos - fig. 4.23.b), em prejuízo da ordenação sistêmica na execução dos serviços.

Em aplicações onde os serviços de alta prioridade são usados em situações de emergência, a segunda opção é mais desejável. Em aplicações integradas, onde a prioridade é um elemento utilizado na interação entre processos comunicantes, a primeira opção é mais desejável.

Em termos de ação da prioridade: no FIP, se restringe aos serviços elementares de uma classe de serviços (no caso, somente aperiódicos); no PROFIBUS, a prioridade atua entre serviços elementares e entre classes de serviços, o que está relacionado com a distribuição da ocupação da camada enlace.

d. Definição do serviço periódico:

No que concerne ao PROFIBUS, o mecanismo de alteração da lista de variáveis do serviço periódico, é uma operação local, em cada controlador, imediata, exequível em qualquer instante, podendo ainda ser parcial. No FIP, é uma operação sistêmica, de

gestão de estação, exequível somente a nível do árbitro ao final de um macro-ciclo.

A estratégia do PROFIBUS facilita a reconfiguração dinâmica do serviço periódico, permitindo ainda sua reconfiguração parcial, por controlador.

No que concerne ao controle de execução do serviço periódico, no PROFIBUS como o fluxo é por controlador (item "a"), a distribuição de ocupação do barramento é livre (item "b") e baseada em prioridade (item "c"), há somente o controle da varredura da Poll_list (n_p), cuja inicialização é ativada pelo controlador, podendo ser uma única vez ou uma vez a cada varredura.

No FIP, o controle de execução inclui, além da varredura, o controle de periodicidade (ciclo elementar).

Adicionalmente a essas considerações gerais de desempenho, é importante acrescentar alguns aspectos, que caracterizam vantagens e restrições destas propostas:

- o tipo de serviço elementar associado ao serviço periódico: no PROFIBUS, é fixo, em torno dos serviços RDR ou SRD, de leitura e intercâmbio de variáveis de um controlador com outra estação, não permitindo combinações dos mesmos ou comunicação cruzada; no FIP, é baseado no serviço TB, para transferência genérica de variáveis entre quaisquer estações, controladores ou dispositivos;
- as restrições de confiabilidade das estações: no FIP reside na figura centralizadora do árbitro, do qual

- depende a funcionalidade do barramento, cujo único recurso de redundância é o árbitro "back-up", em "stand-by", ativado por t_{es} ; no PROFIBUS, ocorre somente em configurações mono-controlador, sendo proposta a duplicidade do árbitro para minorá-la;
- as opções de configuração de parâmetros da camada enlace: no PROFIBUS, são bastante numerosas envolvendo tipos de implementação, "frames", distâncias de Hamming, etc.; no FIP, se restringe aos requisitos H1 e H2 [ISA187]. A diversidade de opções cria um compromisso entre a flexibilidade de configuração e a complexidade de implementação, consideravelmente expressivo no PROFIBUS;
 - o balisamento na padronização: a camada enlace do PROFIBUS é praticamente um "sub-set" do Proway C [IEC286] [ISA85], com simplificações, tais como: número de níveis de prioridade, capacidade/hierarquização de endereçamento, interface LLC/MAC, tipos de "frames" (FT 1.1 e 1.2), "token-passing", distâncias de Hamming, inclusão do serviço periódico, etc.;
 - a estratégia de implementação dos protocolos no FIP é baseada em circuitos VLSI específicos, agrupando as funções de nível mais baixo da camada enlace; no PROFIBUS, é baseada em circuitos UART convencionais, que implementam somente o protocolo orientado a caracter (IEC TC57), sendo as demais funções implementadas em "software". Estas duas soluções caracterizam um compromisso entre o menor custo, maior

flexibilidade de atualização e maior difusão das UART's, frente à maior otimização da implementação VLSI, em relação à implementação do "software" agregado à UART, observável nas indicações de desempenho das propostas. Os focos de maior complexidade na implementação são o árbitro no FIP e as estações mestre (agregadas a controladores) no PROFIBUS.

4.5.3 Implicações sobre aplicações

A seguir são apresentadas algumas considerações em torno do projeto de uma configuração para o FIP e para o PROFIBUS, em distintas aplicações.

4.5.3.1 FIP

Decorre das restrições e características do FIP, uma maior facilidade de configuração para se adequar a aplicações com as seguintes características:

- fluxo de informação mais sistêmico e menos individualizado por controlador, caracterizando uma atualização periódica e aperiódica de bases de dados;
- tráfego periódico sempre presente, com uma importância central, em função da aplicação ser caracterizada por constantes de tempo e períodos de amostragem;
- requisitos de capacidade de transmissão exigentes [NEMA288];
- nível de controle de perdas físicas compatível com os requisitos da aplicação;

tornando aceitável o "overhead" característico do fluxo sistêmico;

- possibilidade de centralização do controle de acesso ao barramento em uma estação árbitro, com sua implicação em termos de confiabilidade.

A título de ilustração, configuração dos principais tempos do FIP consiste em se definir os ciclos elementares, o macro-ciclo e o tamanho das janelas (periódica, aperiódica e de mensagem).

Em uma aplicação eminentemente periódica, a sequência de configuração é a seguinte:

- obtenção das constantes de tempo do processo e decorrentes períodos de interação com o mesmo, em termos de valores, instantes de amostragem e intercalação dos períodos de amostragem (n_p 's executados por t_{CE});
- associação de um ou múltiplos ciclos elementares (t_{CE}) a cada período de interação, até o maior período, correspondente ao macro-ciclo;
- utilização de macro-ciclo com ou sem sincronização, em função das restrições de periodicidade da aplicação;
- definição do tamanho das janelas aperiódica e de mensagem e de n_{IDA} e n_{UP} por controlador, à partir do volume de informação previsto por macro-ciclo, utilizando o espaço não ocupado pelo serviço periódico;
- obtenção de t_{AB} em função das condições acima (fig. 4.25 a 4.32) e reexecução da definição anterior, se não atender aos requisitos do processo.

Em uma aplicação eminentemente aperiódica, a sequência de configuração é a seguinte:

- definição do volume de informação e do t_{AP} exigido pelos fluxos aperiódico e de mensagem de cada controlador;
- definição de t_{CE} , n_p , e da dimensão das janelas, objetivando uma solução de compromisso, que passa pelo:
 - projeto de uma janela periódica fictícia, construída somente para dar vazão às solicitações aperiódicas e de mensagem de cada controlador (n_p), suficientemente grande para atender à demanda de "n" controladores, mas pequena o bastante para limitar t_{AP} . A janela periódica é caracterizada, neste caso, pela associação de um ou mais identificadores periódicos por controlador, para caracterizar o "polling" nos controladores pelo árbitro, a cada t_{CE} (n_p);
- cálculo de t_{CE} considerando o compromisso acima e para macro-ciclo com ou sem sincronização, em função do grau esperado de atuação das prioridades, (fig. 4.29/31 ou 4.30/32).

Este compromisso na configuração de uma aplicação aperiódica é decorrente da estreita dependência que os serviços aperiódicos apresentam em relação ao serviço periódico.

As principais restrições do FIP são decorrentes da sistemização do fluxo periódico, discutida acima e da

centralização do controle acesso ao meio no árbitro (restrição de confiabilidade).

No caso da confiabilidade, é possível melhorá-la através da adoção de um árbitro redundante, em "hot stand-by", que assume o controle do barramento alternadamente com o árbitro principal, para se evitar falhas por latência.

Os mecanismos de implementação desta função podem ser:

- a passagem voluntária da função de árbitro, através de uma transação de gestão, como no MIL-STD-1553B [BURT88];
- a comutação proposital e monitorizada pelo árbitro principal, através de t_{e1} ;
- a comutação fixa, a cada final de macro-ciclo.

4.5.3.2 PROFIBUS

No PROFIBUS, as suas restrições e características facilitam a configuração para adequação a aplicações com as seguintes características:

- controle de acesso ao meio e distribuição do fluxo de informação no tempo, distribuídos entre as estações controladoras, por restrições de confiabilidade;
- tráfego de informações basicamente aperiódico, com requisitos severos de tempo de acesso ao barramento, relativamente a capacidade de transmissão;
- o tráfego periódico, se houver, sem requisitos rígidos de periodicidade, caracterizando apenas um mecanismo de varredura de estações;

- capacidade de transmissão compatível com os requisitos da aplicação (em msg/s) [ISA187];
- nível de controle de perdas físicas, baseado nas perdas finais, como um requisito relevante;
- configuração mono-controlador ou multi-controlador, mas com o "overhead" de rotação do "token" aceitável para a aplicação.

O ponto mais restritivo no PROFIBUS é o serviço periódico. Na utilização do PROFIBUS em aplicações periódicas, as constantes de tempo e decorrentes períodos de interação devem ser suficientemente grandes (10 vezes t_{RR} , por exemplo) ou tolerantes, para suportarem as variações decorrentes da concorrência com outros serviços (fig. 4.17) e da rotação do "token" (fig. 4.19). Outra alternativa é o controle de periodicidade (ativação/desativação do serviço e minoração da concorrência), ser assumido pela camada aplicação. Isto implica no estabelecimento de um conjunto de funções situadas entre a interface da camada enlace com a camada aplicação (camada intermediária), que, em uma configuração mono-controlador se encarregaria de:

- controlar (medir) todas as temporizações dos períodos de interação com o processo;
- ativar o serviço periódico para execução de uma única varredura da Poll_list;
- não requisitar outros serviços, enquanto o serviço periódico estiver em execução.

Em uma configuração multi-controlador, as operações são mais complexas, pois é necessário:

- sincronizar a ativação do serviço com a rotação do "token" (incluído recentemente em [SIEMB8] - alteração das condições estudadas);
- prevenir outras condições em que o t_{TH} disponível é insuficiente para execução de toda a Poll_list.

Neste contexto, uma alternativa é:

- definir os tempos de interação com o processo como múltiplos inteiros de t_{RR} ;
- ativar o serviço periódico, através das seguintes operações:
 - . ler continuamente LLC-status (serviço de gestão que permite ao usuário conhecer o estado da estação local);
 - . ativar o serviço periódico somente quando a estação não estiver de posse do "token", para que a Poll_list comece a ser executada imediatamente após o "token" ser recebido e seja executada completamente uma única vez.

É importante notar que, mesmo esta alternativa:

- demanda que o tempo de execução da Poll_list seja menor que t_{TH} ;
- não resolve o problema do atraso na rotação do "token", que restringe t_{TH} (t_{RR} divergindo de t_{TR});
- é sensível a defasagem entre as temporizações da camada intermediária e t_{RR} ;

- utiliza uma função de gestão de estação, que configura um "by-passing" permanente das funções da camada enlace, fugindo ao conceito de camada [VISS86];
- está baseada em uma "camada intermediária", assim denominada pois, em princípio, as entidades de aplicação (AE) têm liberdade de utilização dos serviços da camada enlace, paralelamente. Contudo, a "camada intermediária" restringe a solicitação dos serviços aperiódicos pelas AE, quando o serviço periódico está em execução, caracterizando um elemento de interface entre as camadas enlace e aplicação;
- impõe um "overhead" considerável à camada aplicação (ou "camada intermediária").

Este conjunto de considerações, que fecham a análise desenvolvida sobre o serviço periódico do PROFIBUS, impõem restrições importantes as aplicações periódicas.

A título de ilustração, uma configuração dos tempos do PROFIBUS é bastante simplificada, consistindo em se definir, basicamente, t_{TR} (e t_{TH}) - multi-controlador. t_{TR} é a única temporização periódica do PROFIBUS.

Para uma aplicação eminentemente periódica, multi-controlador, t_{TR} pode ser ou não utilizado como referência de tempo, segundo as considerações descritas anteriormente. De qualquer forma, t_{TR} é, no máximo, o menor tempo entre interação com o processo.

Em uma configuração mono-controlador, à partir da definição de uma "camada intermediária", é necessário que o serviço periódico seja sempre de maior prioridade.

Em uma aplicação aperiódica, multi-controlador, t_{TR} é definido para condições médias de fluxo de informação [SIEM87].

Estes resultados demonstram a maior facilidade de configuração do PROFIBUS em aplicações aperiódicas e do FIP em aplicações periódicas.

4.5.4 Alternativa para camada enlace

A luz das vantagens e restrições de cada proposta, a seguir é apresentado o perfil de uma proposta alternativa de camada enlace, que procura combinar os aspectos mais positivos do PROFIBUS e FIP, e minimizar os efeitos das suas restrições.

As principais características desta combinação consistem em:

- fluxo de informação individualizado por controlador, semelhante ao PROFIBUS, sendo que a transferência do controle do barramento entre os controladores é feita com o "token passing";
- distribuição fixa da ocupação da camada enlace pelos serviços, baseada em janelas, como no FIP, mas implementados em cada um dos controladores, que passam a operar como o árbitro do FIP, na execução de um ciclo elementar, que ocupe o seu tempo para retenção do "token" ($t_{TH} = t_{CE}$ - fig. 3.15.c). Ou seja, cada controlador mede t_{CE} ($= t_{TH}$) e, após sua expiração, transfere o "token" para o controlador seguinte (multi-

- controlador) ou reinicia outro ciclo elementar (mono-controlador);
- resolução de prioridades abrangendo a classe de serviços e não entre serviços, como no FIP, e atuando localmente sobre as solicitações no âmbito do controlador, como no PROFIBUS. Os serviços, assim solicitados, são executados em cada controlador nas suas janelas aperiódica e de mensagem;
 - serviço periódico individualizado por controlador, permitindo configuração e reconfiguração flexível, como no PROFIBUS, mas implementado através da execução obrigatória, uma única vez, na janela periódica do ciclo elementar (t_{CE}/t_{TH}) de cada controlador, como no FIP, mesmo que t_{TH} seja nulo (distinção em relação ao PROFIBUS). Os ciclos de interação com o processo têm como base t_{RR} (menor taxa de interação com o processo, do ponto de vista de um dos controladores) e a camada enlace controla a execução da Poll_list segundo a taxa de interação requerida por cada variável. Isto pode ser implementado sem necessidade de contagem adicional de tempo na camada enlace, através da associação de dois parâmetros a cada variável da Poll_list, em cada controlador:
 - . taxa de execução da varredura, como um múltiplo inteiro de t_{RR} , indicando o número de rotações do "token" por varredura;
 - . fase de varredura da interação de uma variável em relação a outra, contada à partir da primeira posse

do "token", subsequente à ativação do serviço periódico, permitindo agrupar as varreduras das variáveis em diversas combinações, alcançando a definição de uma lista de variáveis periódicas particular, para cada recepção do "token".

O fluxo periódico, neste contexto, é individualizado por controlador, mas é possível a configuração de um fluxo periódico sistêmico à partir da introdução de procedimentos de sincronização dos controladores, através, por exemplo, de mensagens indicativas (SDN) do instante inicial de um "macro-ciclo", emitidas pela última estação (HSA) do anel lógico. O macro-ciclo, assim definido, é composto pela combinação dos ciclos elementares de cada controlador e equivalente a t_{RR} .

- utilização dos serviços elementares e da associação com as classes de serviços adotada pelo PROFIBUS, mas com a possibilidade adicional de se associar diferentes serviços elementares (SDA, SDN, RDR ou SRD) ao serviço periódico, multiplicando as combinações para o fluxo de informação.

Esta alternativa permite:

- a eliminação da figura do árbitro como elemento centralizador do acesso ao meio, distribuindo suas funções pelos controladores e melhorando a confiabilidade do barramento;
- a flexibilização da configuração e reconfiguração global dos diversos fluxos, no âmbito dos usuários

- controladores, possibilitando diversas combinações de aplicações (periódicas e/ou aperiódicas);
- a eliminação do "overhead" característico do fluxo sistêmico em função das solicitações dos serviços aperiódicos e de mensagem serem locais a cada controlador, melhorando t_{AB} e $E\%$ (condições do PROFIBUS);
 - a eliminação da inconsistência espacial, intrínseca ao fluxo sistêmico do FIP;
 - a garantia de uniformidade e periodicidade do serviço periódico, equivalentemente ao FIP (fig. 4.20 e 4.22). Contudo, como controle de periodicidade e uniformidade é individualizado por controlador, em configurações multi-controladores a periodicidade do FIP é mais garantida.

Em relação a Q_u , é desejável se preservar os valores obtidos no FIP. Para isso, como a proposta está baseada no PROFIBUS, em termos de serviços elementares e MAC, é recomendável:

- manter a relação com a especificação PROWAY C e IEC TC57, restrita a FT 1.2 (HD=4);
- reduzir a multiplicidade de opções de configuração do PROFIBUS, a uma única opção, em termos de:
 - . tipos de frames;
 - . endereçamento;
 - . implementação, procurando otimizar a implementação tipo "B", para alcançar, principalmente, os valores

- limitar as variações em $O_{t_{PRF}}$ (fig. 4.18), devido a condições transitórias de falha e/ou reconfiguração no anel lógico.

Esta proposta materializa o resultado da análise comparativa de desempenho e indica a alternativa adotada para as considerações em torno do modelo, discutidas no item 4.5.2 (fig. 3.1). Ou seja:

- fluxo por controlador, com possibilidade de algum acoplamento sistêmico no serviço periódico;
- distribuição fixa da ocupação da camada enlace;
- resolução de prioridades no âmbito de um serviço e por controlador;
- serviço periódico com controle de periodicidade incorporado na camada enlace.

Neste último aspecto, cabe observar que a proposta alternativa é uma forma estruturada de se incorporar as funções da "camada intermediária" na camada enlace do PROFIBUS, minimizando o "overhead" sobre o seu usuário.

4.6 CONCLUSÃO

O presente capítulo desenvolveu a análise comparativa de desempenho das camadas enlace do FIP e do PROFIBUS, partindo das informações parametrizadas no Capítulo 3.

As etapas de desenvolvimento consistiram: na modelagem dos serviços individuais e combinados, segundo uma metodologia que estabelece a geração dos modelos em fases; na simulação dos

modelos do ARP; na análise individual e comparativa dos resultados, baseada no modelo de camada enlace estabelecido no Capítulo 3.

A partir deste modelo e dos resultados da análise de desempenho, foi desenvolvida uma comparação abrangente do PROFIBUS e do FIP, resultando em uma análise de vantagens e restrições de cada proposta, à luz de distintas aplicações. Procurando combinar as vantagens e minorar as restrições de cada proposta, estabeleceu-se uma proposta alternativa de camada enlace, que materializa o resultado da análise comparativa.

O desenvolvimento deste capítulo permitiu o alcance dos objetivos fixados no Capítulo 3, no que concerne ao estabelecimento de um paralelo entre o PROFIBUS e o FIP, encarados como duas filosofias de implementação de camada enlace.

A comparação destas propostas, mais que indicar a melhor implementação de camada enlace, viabilizou a parametrização quantitativa dos principais elementos que concorrem no seu desempenho e, com isso, o entendimento abrangente das vantagens e restrições de cada uma.

FIP e PROFIBUS são boas propostas, dependendo do prisma de análise. Entender os compromissos de desempenho mostrou-se mais importante que selecionar uma delas, em detrimento da outra.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de desempenho da camada enlace de dados de "field-bus", focalizando a análise de duas entre as principais propostas candidatas à padronização.

Partindo-se de um estudo abrangente dos conceitos envolvidos no contexto em que está inserido, identificou-se as duas principais restrições sistêmicas à adoção de "field-bus" (restrições de tempo e confiabilidade). A luz das restrições de tempo, e à partir da definição de um modelo para a camada enlace, estabeleceu-se os critérios e a metodologia para um estudo de desempenho do FIP e do PROFIBUS. A aplicação desta metodologia resultou num levantamento detalhado das especificações de camada enlace, que permitiu a modelagem dos seus serviços em Redes de Petri Temporizadas Extendidas. Com a simulação destes modelos, obteve-se os resultados de desempenho, que permitiram uma análise detalhada das vantagens e restrições de cada proposta, para os diversos elementos de desempenho estabelecidos.

Os resultados da análise do desempenho das duas propostas demonstraram: a superioridade da capacidade de transmissão e do serviço periódico do FIP; a superioridade do controle de perdas e da qualidade do serviço aperiódico do PROFIBUS, proporcionalmente à sua capacidade de transmissão; a equivalência dos resultados de eficiência, com certa superioridade para o FIP. O serviço aperiódico, em particular, evidenciou o compromisso entre as filosofias de implementação do FIP e do PROFIBUS.

Frente a esses resultados, foram estabelecidas sugestões relativas a uma proposta alternativa de camada enlace que, procurando combinar as vantagens e minorar as restrições de cada proposta, materializou o resultado da análise comparativa de desempenho.

Em termos dos resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho, além da análise de desempenho propriamente dita, o trabalho contribuiu para o estabelecimento de um modelo genérico de camada enlace de "field-bus" e de uma metodologia para a sua avaliação, que permite caracterizar filosofias de implementação, ao invés de detalhes construtivos. Com isso, ela é aplicável na análise das outras propostas não analisadas; e de opções de configuração, para análise de adequação aos requisitos de determinada aplicação. Além disso, a aplicação desta metodologia sobre a camada enlace do PROFIBUS e do FIP, resultou no entendimento abrangente do seu comportamento e na formalização deste entendimento em modelos utilizáveis [AGUI689] para avaliações de desempenho individuais ou comparativas, em outras condições ou com outras finalidades.

Adicionalmente, com o trabalho de modelagem e simulação foi possível corroborar com resultados quantitativos comportamentos que, intuitivamente, se previa, bem como estudar profundamente as especificações das propostas e suas implicações.

Em função de possibilitar uma visão abrangente das propostas e esforços no âmbito do "field-bus", as perspectivas para a continuidade deste trabalho são muito promissoras.

No âmbito dos trabalhos de modelagem, seria interessante repetir o estudo para:

- outras propostas candidatas à padronização ou versões mais atualizadas do FIP e PROFIBUS, utilizando uma nova versão do ARP, desenvolvida à partir das restrições apontadas no Capítulo 4;
- configurações e condições de avaliação mais gerais que as estabelecidas no Capítulo 4 e, em decorrência, envolvendo modelos em Redes de Petri mais complexos;
- modelos que incluam a camada aplicação.

Uma possibilidade interessante de um trabalho mais a nível de implementação, consiste no desenvolvimento das camadas física, enlace e aplicação de uma das propostas de "field-bus", na consecução de uma configuração que possibilite a posterior execução de testes de desempenho, similares aos aplicados aos modelos. Este desenvolvimento teria possibilidades de aproveitamento até mesmo a nível de posterior industrialização [AGUI889] [CERT289], além de estar inserido no contexto dos atuais esforços de desenvolvimento da UFSC, a nível de CIM ("Computer Integrated Manufacturing").

Em termos das perspectivas de padronização, acredita-se haver ainda um caminho considerável a se percorrer, até a consecução de um padrão estável para "field-bus". Um caminho que passa não somente por considerações técnicas e de desempenho, como as tratadas no presente trabalho. Certamente, as características técnicas e tecnológicas serão fatores determinantes do padrão, mas aliadas a fatores outros tais como: custo, volume de implementações operacionalizadas e poder político e mercadológico dos proponentes.

Contudo, mesmo considerando estes aspectos, é de importância fundamental a consecução de um padrão internacional para o "field-bus", pelos seus relevantes benefícios intrínsecos; bem como a ampla adoção do conceito de "field-bus" pelos fabricantes de dispositivos de campo em automação e instrumentação, através da integração dos seus protocolos aos respectivos dispositivos, condição essencial à estabilidade do padrão.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

6.1 ESFORÇOS DE PADRONIZAÇÃO

6.1.1 Avaliadores

6.1.1.1 IEC

- [IEC488] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C, WG6. Fieldbus standard for use in industrial control systems. Appendices from meeting 9/7-14, Kista, Suécia, Sept. 1988.
- [IEC388] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C, WG6. Field-bus standard for use in industrial control systems. Minutes of meeting, 9/7-14, Kista, Suécia, Sept. 1988.
- [IEC288] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC57. Amendment to Document 57-31: telecontrol equipment and systems. Part 5.1: transmission frame formats. Suíça, Apr. 1988.
- [IEC188] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC57. Document 57-78 telecontrol equipment and systems. Part 5.2: Link transmission procedures. Suíça, Feb. 88.
- [IEC386] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C. Field bus Standard for the Use Industrial Control Systems, Functional Requirements, July 1986.

- [IEC286] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C. Publication 955: Process Data Highway, type C (Proway C), for distributed process control systems, pieces I-IX, Suíça, Jan. 1986.
- [IEC186] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C. Publication 955: Process Data Highway C Draft, Jan. 1986.
- [IEC385] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC57. Document 57-31: Telecontrol equipment and systems Part 5.1: transmission frame formats. Suíça, Dec. 1985.
- [IEC285] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC57. Telecontrol equipment and systems Part 5.1, 5.2, Dec. 1985.
- [IEC185] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C. An Interface system for programmable measuring instruments. Part 2 (Revision of Publication 625-2), Suíça, Jan. 1985.
- [IEC82] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. TC65, SC65C. Amendments to document 65A-10: process data highway (Proway) for distributed process control systems. Part 1, Suíça, Dec. 1982.

6.1.1.2 ISA

- [ISA287] INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA. Field bus presentation draft, May. 1987.

- [ISA187] INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, Standard Practice 50, Field Instrument Bus Standard, Functional Guidelines, Estados Unidos, Sept. 1987.
- [ISA85] INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA Standard 72.01, Proway - LAN Industrial Data Highway, Estados Unidos, Feb. 1985.

6.1.1.3 EUREKA

- [BORS88] BORST, W. et alii. Der EUREKA-Feldbus für die Instrumentierungstechnik der 90er Jahre. Automatisierungstechnische Praxis AIP, Alemanha, (9), Sept. 1988.
- [LIND88] LINDNER, K.P. Erste Ergebnisse im Eureka-Feldbus Project. Automatisierungstechnische Praxis AIP, Alemanha, p.252-2, Sept. 1988.
- [EURE87] EUREKA Field Bus Project. List of Needs and functionalities. França, May. 1987.

6.1.1.4 IEEE

- [IEEE87] IEEE. Project 1118 - Microcontroller system serial control bus. Voting draft. Functional requirements document. Version 2.0. Aug. 1987.

6.1.1.5 NEMA

- [NEMA288] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. NEMA fieldbus description, Estados Unidos, Aug. 1988.

6.1.2 Proponentes

6.1.2.1 PROFIBUS

- [ABEL89] ABEL, M. et alii. Open communications in low cost fieldbus systems, Siemens AG. Kalsruhe, Sept. 1989, 5p
- [BAUM89] BAUMEISTER, M. Anwenderschnittstelle - Einbindung der kommunikation in den anwendungspross. Workshop in der Automatisierungstechnik, Hannover, 1989.
- [DORI89] DORING, R. & HORGER, J. PROFIBUS - Multivendoranlage EMO and INTERKAMA, Hannover, 1989 (Catálogo BMFT), 4p.
- [GODD89] GODDERTZ, J. PROFIBUS - Protokolle. Bonn, VDI Berichte, (728): 47-69, 1989.
- [HEID89] HEIDEL, Roland. Der PROFIBUS, ausblick, einsatz und implementierungshinweise. Siemens AG Kalsruhe, Sept. 1989, 11p.
- [OEXN89] OEXNER, M. The PROFIBUS project: organization and goals. Siemens AG Kalsruhe, Sept. 1989, 3p.
- [PFEI89] PFEIFER, T. & STOLBEN, P. PROFIBUS - Anwendungen in der fertigungstechnik. Aachen, VDI Berichte, (728): 97-114, 1989.
- [BMFT88] BMFT - Verbundprojekt Feldbus. PROFIBUS Die offene Kommunikation im Felbereich für Fertigungs - und Verfahrenstechnik. Catálogo PROFIBUS, Alemanha, s.n.t.

- [HOFM88] HOFMANN, E. Das BMFT - Verbund projekt Feldbus
Automatisierungstechnische Praxis ATP. Alemanha,
p. 212a6., Sept. 1988.
- [SIEM88] SIEMENS AG. PROFIBUS proposal to ISA SP50 for field
bus standard, Feb. 1988.
- [WAR288] WARRIOR, J & DOBRICH, U. Field-bus application layer,
(Proposta conjunta Siemens AG, Rosemount Inc.),
Nov. 1998.
- [WARR188] WARRIOR, J & COBB, J. Structure and flexibility for
field-bus messaging. Control engineering, 2:18-20,
Oct. 1988.
- [DIN87] DIN V.19245. PROFIBUS Process field bus. Teil 1.
version 4.0., 1987.
- [HEIL87] HEILER, K.U. Nationale und internationale aktivitäten
zum thema "fieldbus", conferência interna WZL
(Laboratorium für Werkzeugmaschinen und
Betriebslehre). Alemanha, Mai.1987.
- [KOMI87] KOMISCHKE, M & PFEIFER, T. Feldbus zur vernetzung
einfacher automatisierungs-komponenten.
Kommunikationstechnik, (15): 710-3, 19887.
Documento interno.
- [PFEI87] PFEIFER, T. & HEILER K.V. Ziele UND Anwendungen von
Feldbassystemen. Automatisierungstechnische Praxis
ATP, Alemanha, Dez. 1987.
- [SIEM87] SIEMENS A.G. PROFIBUS proposal to ISA SP50 for field
bus standard, Sept. 1987.
- [SIEM285] SIEMENS A.G. Einige Überlegungen zum Feldbus -
Anlage, Jun. 1985. Documento interno.

- [SIEM85] SIEMENS AG. Empfehlung für die vorgesehene norm
feldbus - scope, Mai.1985. Documento interno.
- [HOHM84] HOHMANN, K.H. Wirtschaftliche Prozessdatenerfassung
mit Feldbus-System. Regelungstechnische Praxis,
Alemanha, 6:257-63, Jan. 1984.
- [MULL84] MÜLLER, M.W. Protocol I, im dezentrales
Industrieleitsystem - Auns den Unternehmen.
Regelungstechnische, Alemanha, 11: 513-7, Jan.
1984.
- [DIN82] DIN 19241. Bitserial process data highway interface
system part 1: Serial digital interface (SDS).
Alemanha, 1982.
- [HOFM--] HOFMANN, E. Das BMFT - Verbundprojekt "feldbus".
Karlsruhe, Siemens, 8p.
- [PFEI1--] PFEIFER, T. PROFIBUS - open communications fieldbus.
Aachen, 4p.
- [PFEI2--] PFEIFER, T. & HEILER, K. U. Network standardization
in preparation for the introduction of information
technologies in production, Aachen, 11p.

6.1.2.2 FIP

- [FIP89] FIP CLUB. FIP transparências descritivas do FIP.
França, nov. 1989.
- [CINA88] CINARE, François. Le réseau FIP gagne du terrain.
Minis & Micros, 313:16-21, França, dez. 1988.
- [DOUC88] DOUCET, Rene. Interconnexion de FIP avec d'autres
reseaux, GT2 - club FIP. França, documento interno,
jan. 1988.

- [FIP288] FIP CLUB. Press conference/press release. França, Nov. 1989.
- [FIP188] FIP CLUB. The open field-bus industrial application of FIP (catálogo de divulgação). França, 1988.
- [UTE88] UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITÉ. FIP Service specification of the application layer. French Draft Standard Proposal C 46-602 number 128 WG6 UTE Committee 46. França, Jun. 1988.
- [THOM88] THOMESSE, J.P. System FIP couche liason de donnees. França, Club FIP, jan. 1988.
- [DESJ87] DESJARDINS, M. Le bus FIP etat et perspectives. INPL. A.R. França, apr. 1987.
- [FIP287] FIP, CLUB. Application layer services - transparências gerais. França, Apr. 1987.
- [FIP187] FIP CLUB Flux information processus/Factory instrumentation protocol (catálogo de divulgação), França, 1987.
- [THOM387] THOMESSE, J.P. A study of LLC services implementations for a field-bus, IECON87, 1987.
- [THOM287] THOMESSE, J. P. FIP A standard proposal for fieldbus. Club FIP. França, Sept. 1987.
- [THOM187] THOMESSE, J.P. FIP A standard proposal for field bus. Club FIP, França, Jan. 1987.
- [THOM86] THOMESSE, J.P. et alii. An industrial instrumentation local area network, IECON86, 1986.
- [THOM85] THOMESSE, J.P. Les reseaux locaux industriels, ETA, França, 1985.

[GALAB4] GALARA, D & THOMESSE, J.P. Proposition d'un systeme de transmission serie multiplexe pour les échanges d'informations entre des capteurs, des actionneurs et des automates reflexes. Ministerie de L'industrie et de la recherche, França, 1984.

[TELE--] TELEMECANIQUE Comentaires lecture interne, s.n.t.

6.1.2.3 MIL-STD-1553B

[BURT88] BURTON, P. et alli. Field bus based on MIL-STD 1553B Proposal to ISA SP-50, Issue 2, England, Era Technology Ltd, June 1988.

[DESC88] DESCASALE, C. Taking the mistery out of MIL-STD 1553B. Electronic Design, Oct. 1988.

[BURT87] BURTON, P. Industrial Field-bus based on MIL-STD 1553B development and trial, Era proposal 81-02-0390, England, Era Technology Ltd, Mar. 1987.

[FRAN87] FRAN CART, D. et alii. MIL-STD-1553B. Multidrop bus controlling lep and SPS equipment, User's manual, Inglaterra, ERA Technology, 1987.

[SNYD87] SNYDER, D.R. Control MIL-STD-1553 with remote terminal chips, Electronic Design, p. 109-114, Aug. 1987.

[FRAN85] FRAN CART, D. et alii. MIL-1553B Multidrop bus for controlling lep and sps equipment - user's manual, nº 56, Lep Controls Note, Inglaterra, Dec. 1985.

[MARC84] MARCONI ELECTRONIC DEVICES LTDA. MIL-STD 1553B data bus summary (Manual do fabricante), Mar. 1984.

[MARC283] MARCONI electronic devices Ltd. MEDL 1553B LSI chipset remote terminal specification - MIL STD 1553B multiplex highway (Manual do fabricante), England, 1983.

[MARC183] MARCONI electronic devices Ltd. Subsystem interface for MEDL LSI 1553B remote terminals - MIL-STD 1553B multiplex highway (Manual do fabricante), England, 1983.

[DEPA78] DEPARTAMENT of defense USA. Military standard MIL-STD1553B Aircraft internal time division command/response multiplex data bus, Washington, DC, Sept.1978 (versão com revisões de 1986).

6.1.2.4 Foxboro

[FOX889] FOXBORO Company. Extended data link layer - A compromise proposal that provides both central and distributed access - Draft, Inglaterra, Apr. 1989.

[FOX888] Foxboro Company. Proposal ISA SP-50 fieldbus. Draft 1.12, Inglaterra, Feb. 1988.

[FOX887] FOXBORO. Foxboro field-bus proposal to ISA SP-50 committee (conjunto de transparências), Dec. 1987.

6.1.2.5 Rosemount

[ROSE88] ROSEMOUNT Inc. Proposed fieldbus solution to be demonstrated, Estados Unidos, 1988.

[ZIEL87] ZIELINSKI, M. Fieldbus proposal to ISA SP-50.
Rosemount inc. Estados Unidos, Oct. 1987.

6.1.2.6 Philips

[SCHU87] SCHUUR, C. ISA SP-50 field-bus paper. Nederlands
Philips Bedrijven B.V. (conjunto de "slides"),
Holanda, Oct. 1987.

6.1.2.7 Propostas parciais

[VASS87] VASSIGHI, G. Galvanic isolation requirements for
field communication systems, presented to the ISA
SP-50 physical layer subcommittee, Estados Unidos,
Bell Microsensors Inc, Dec. 1987.

6.1.2.8 Sistemas afins não proponentes

[AMRH88] AMRHEIN, B. Filbus: réseau de terrain pour temps
reel, Minis & Micros, 313: 59-61, França, Dec.
1988.

[ANDR88] ANDREWS, W. Bitbus gains support for building low
cost serial bus, Computer Design, Feb. 1988.

[DIET88] DIETSCH, H. et alii. Laborinth - Ein einheitliches
kommunikationschonzept für PDV-bus, Bitbus und IEC-
bus, VDI 88, Alemanha, 1988.

[PHIL88] PHILIPS. Development data: PDV bus controller (DLC)

- [KOCH87] KOCHAR, V. Un réseau local industriel: Bitbus Instrumentation et systèmes, Z:23, Oct. 1987.
- [PFEI87] PFEIFER, T & HEILER, K.U. Ziele und anuendungen von feldbus systemen, Automatisierungstechnische Praxis AIP, Alemanha, dez. 1987.
- [WALZ86] WALZE, H. Low cost LAN supplements MAP for real time applications, IFAC Low Cost Automation, Espanha, 1986.
- [INTE84] INTEL. VLSI Solutions for distributed control applications, Estados Unidos, Sept. 1984.
- [DIET--] DIETSCH, H. et alii. Funkuhr und rechnertaht gestenerte time-server-prozesse im Laborinth-Netzwerk-verbund, s.n.t.
- [PHIL--] PHILIPS. DDB Digital Data Bus specification Philips Data Handbooks, s.n.t.

6.2 ANÁLISE DO CONTEXTO E CONCEITOS GERAIS

- [MENDB9] MENDES, M. J. Padronização de barramento de campo - Parte 2 (documento preliminar para dar origem a uma iniciativa nacional em "field-bus"). São Paulo, fev. 1989.
- [WOOD89] WOOD, G.G. Fieldbus as it moves into 1989. Fieldbus seminar & BITS, Inglaterra, Feb. 1989.
- [CARO88] CARD, R.A. Benefits of the field bus, 1988.
- [GRAN88] GRANT, C.R. Terminal networks and OSI migration strategies, 1988.

- [NEMA188] National Electrical Manufacturers Association, Honeywell comparison and analysis of field-bus proposal to ISA SP-50, Estados Unidos, Mar. 1988.
- [NASC88] NASCIMENTO, L.G.G. Uma comunicação para os equipamentos de campo, Automação e Indústria, Brasil, abr. 1988.
- [SCHE88] SCHEIDENBERGER, G. PROFIBUS und FIP kommunizieren, Automatisierungs Technische Praxis ATP, Alemanha, Sept. 1988.
- [WOOD288] WOOD, G.G. Industrial LAN architectures for factory and process automation, Industrial LAN, CEN/CENELEC, Nov. 1988.
- [WOOD188] WOOD, G.G. International standards emerging for fieldbus. Control Engineering, 2: 22-5, Oct. 1988.
- [ULME88] ULMER, M. Field-bus, um novo padrão de rede local industrial? Automação e Indústria, mai. 1988.
- [DEC087] DECOTIGNIE, J.D & PLEINEVAUX, P. Field-bus in the hierarchy of communication: the limits of a classical approach. Workshop on Factory Communications, 1987.
- [DESM87] DESMONS, D. & DECOTIGNIE, J.D. Field-bus in the numerical control of machine-tools: how to get best of it, International Workshop on Industrial Automation Systems, Japão, Feb. 1987.
- [KAZA87] KAZAHAYA, M. Addressing and preseted variables of the fieldbus. Intech, Estados Unidos, Sept. 1987.

- [PLEI287] PLEINEVAUX, P. et alii. Network management architecture of a centrally controlled field-bus. EFOC/LAN 87, Suíça, Jun.1987.
- [PLEI187] PLEINEVAUX, P. Field-bus: a new and efficient tool in process control, s.n.t.
- [WOOD87] WOOD G.G. Survey of LANs and standards. Computer Standards & Interfaces, 6: 27-32, Holanda, Jun. 1987.
- [WOOD186] WOOD. G.G. Field bus, a developing low level industrial LAN standard. EFOC/LAN 86, p.322-4. Países Baixos, Jun. 1986.
- [ZWOL85] ZWOLL, K. et alii, A Low cost local area network for connecting accelerator equipment, Vancouver (Canadá), May. 1985.

6.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

6.3.1 Redes de Petri

- [LCMI89] Laboratório de Controle e Micro-Informática. Analisador/Simulador de Redes de Petri ARP-2 - Manual de Descrição/Utilização. Brasil, jan. 1989.
- [MAZI89] MAZIERO, C.A. et alii. O ambiente ARP de análise e simulação de sistemas modelados por Redes de Petri. Caderno Temático de Pesquisas - Automação. UFSC. v-1, p 7-8. Florianópolis (BR), out. 1989.

- [ROUX87] ROUX, J-L. & JUANOLE, G. Functional and performance analysis using extended time Petri nets. International Workshop on Petri Nets and Performance Models, Aug. 1987.
- [AYAC85] AYACHE, J.M. et alii. Utilisation des réseaux de petri pour la modélisation et la validation des protocoles, Technique et Science Informatiques, p.51-71, França, 1985.
- [JUAN85] JUANOLE, G & NOVALI, J.M. Le controle de flux dans les communications: specification formelle au moyen de reseaux de Petri et verification, LAAS-CNRS, França, 1985.
- [MEN85] MENASCHE, M. Parede: an automated tool for the analysis of time(d) petri nets. IEEE, p. 162-9, 1985.
- [ROUX285] ROUX, J.L. Modélisation et analyse des systèmes distribués par les reseaux de petri temporels These Docteur-Ingénieur, Automatique, INSA, n° 156-Toulouse, p.97-125, França, 1985.
- [ROUX185] ROUX, J.L. Analyse du protocole d'accès au bus dans le reseau local industriel Proway, Rapport LAAS n° 85.002, França, jan. 1985.
- [COUR84] COURTIAT, S.P. et alii. Petri nets are good for protocols, Computer Communication Review, 4(2): 9.1-9.9, Jun. 1984.

- [MEN83] MENASCHE, M & BERTHOMIEU, B. Time Petri nets for analysing and verifying time dependent communication protocols, Protocol Specification, Testing and Verification, III.IFIP, p.161-171, Holanda, 1983.
- [DIAZ82] DIAZ, M. Modelling and analysis of communication and cooperation protocols using Petri net based models. Protocol specification, testing and verification. IFIP, p.465-510, Estados Unidos, May. 1982.
- [PETE81] PETERSON, J.L. Petri net theory and the modeling of systems. Prentice Hall, Inc. Estados Unidos, 1981.

6.3.2 Desempenho de redes

- [VISS86] VISSERS, C.A. & LOGRIPPO, L. The importance of the service concept in the design of data communications protocols, p.1.3-17, Holanda, IFIP 1986.
- [CELL84] CELLARY, W & STROINSKI, M. Analysis of methods of computer network performance measurement, IFIP, 1984.
- [BUX83] BUX, W. Performance issues in local-area networks Advanced Course on Local - Area Networks, Escócia, July 1983.
- [LELA283] LELANN, G. Trends in industrial local area networks Advanced Course on Production Management, EIASM - Projeto SCORE, França, Jan. 1983.

- [LELA183] LE LANN, G. On real-time distributed computing FIP, França, Sept. 1983.
- [PRIN81] PRINCE, S.M. & SLOMAN, M.S. Communication requirements of a distributed computer control system, IEEE Proceeding, V.128 Pt.E, nº 1. EUA, Jan. 1981.

6.4 BIBLIOGRAFIA BÁSICA COMPLEMENTAR

- [CERT189] CERTI. Projeto Laboratório CIM - Computer Integrated Manufacturing - Implantação piloto UFSC/CERTI. (Catálogo de divulgação). Florianópolis (BR), jun. 1989.
- [VALA89] VALADIER, J.C & BURNETT, R.C. A rede experimental Quasimap de comunicação normalizada em controles de produção, Brasil, 1989.
- [IEEE188] IEEE 802.4 "IEEE Standard 802.4 " - Token passing bus access method and physical layer specifications, Draft 1, Aug. 1988.
- [ISO288] International Organization for Standardization ISO/DIS 9506-2. Manufacturing message specification, 1988. Part 2: Protocol specification.
- [ISO188] International Organization for Standardization ISO/DIS 9506-1. Manufacturing message specification, 1988. Part 1: Service definition.

- [MAP87] MAP/TOP. Users Group of SME, "Manufacturing Automation Protocol, version 3.0", Jul. 1987.
- [MEND87] MENDES, & MAGALHÃES. Redes locais industriais e o projeto de padronização MAP/TOP, Seminário de Automação Industrial, Campinas, jul. 1987.
- [GOMI86] GOMIDE, F.A.C. & ANDRADE NETTO, M.L. Introdução a Automação Industrial Informatizada, EBAI Campinas, nov. 1986.
- [DIRV86] DIRVIN, Rhonda Alexis & MILLER, Arthur R. The MC68824 token bus controller: VLSI for the factory LAN. IEEE Micro, p.15-25, June 1986.
- [ISO86] International Organization for Standardization ISO/DIS 8824. Information processing systems - open systems interconnection - specification of abstract syntax notation one (ASN.1), 1986.
- [KRIT86] KRITZINGER, Pieter S. A performance model of the OSI communication architecture. IEEE Transactions on Communications, COM-34(6): 554-63, Jun. 1986.
- [MERR86] MERRICK, Margaret A. & GORDON, Maureen E. MAP and the process industries. Control Engineering, Foxboro, p.26-7, Oct. 1986.
- [SUMM86] SUMMERS, Catherine F. & WEAVER, Alfred C. Performance of IEEE 802.4 - the basis of MAP. IECON'86, p. 151-57, 1986.
- [THOM86] THOMESSE, J.P. & DELCUVELLERIE, J.L. Functional and operative architectures in flexible manufacturing systems, França. IECON'86, p.823-39, 1986.

- [ISO84] International Organization for Standardization ISO 7498. Information processing systems interconnection - basic reference model, 1984.
- [CHAP83] CHAPIN, A. Lyman. Connections and connectionless data transmission, Proceedings of the IEEE, 71(12): 1365-71, Dec. 1983.
- [DAY83] DAY, John D. & ZIMMERMANN, Hubert. The OSI reference model. Proceedings of the IEEE, 71(12): 1365-71, Dec. 1983.
- [JAYA] JAYASUMANA, Anura P. & FISHER, P. David. Performance modeling of IEEE 802.4 token bus, p.221-52.

6.5 DOCUMENTOS INTERMEDIÁRIOS GERADOS

- [AGUI1989] AGUIAR, M.W.C. de Projeto "field-bus" - Estratégia Operacional (Capítulo 4). Contribuição do CERTI para a criação de um projeto nacional de "field-bus", envolvendo CTI, CERTI e membros do CB-21 (ABNT). São Paulo, fev. 1989.
- [AGUI1889] AGUIAR, M.W.C. de. "Field-bus" (barramento de campo) para interligação de dispositivos de medição, atuação e controle. 3º Encontro regional universidade - empresa para transferência de tecnologia. ANPEI/UFSC - CERTI. Florianópolis (BR), nov. 1989.

- [AGUI789] AGUIAR, M.W.C. de. Análise de viabilidade de implantação de DNC. 3º Seminário sobre Automatização Industrial para a Região Sul/Revista Máquinas e Metais, nº 279, Joinville (BR), abr. 1989.
- [AGUI689] AGUIAR, M. W. C. de & FRITZKE Jr, U. Resultados e procedimento experimental - Análise de desempenho - Documento Interno nº 08, CERTI/LCMI, Florianópolis (BR), out. 1989.
- [AGUI589] AGUIAR, M. W. C. de & FARINES, J-M. Field-bus: análise comparativa de desempenho das principais propostas candidatas a padronização internacional. 9º Seminário de Comando Numérico no Brasil, São Paulo (BR), ago. 1989.
- [AGUI489] AGUIAR, M. W. C. de. PROFIBUS/FIP Descrição detalhada dos serviços da camada enlace. Documento nº 06 CERTI/LCMI, Florianópolis (BR), maio. 1989.
- [AGUI389] AGUIAR, M. W. C. de. MIL-STD 1553B Descrição Geral - Documento Interno nº 05, CERTI/LCMI, Florianópolis (BR), jan. 1989.
- [AGUI289] AGUIAR, M. W. C. de. FIP Descrição Geral. Documento Interno nº 04, CERTI/LCMI, Florianópolis (BR), jan. 1989.
- [AGUI189] AGUIAR, M. W. C. de. PROFIBUS Descrição Geral. Documento Interno nº 03 CERTI/LCMI, Florianópolis (BR), jan. 1989.

[CERT289] CERTI. Desenvolvimento de um "field-bus" para interligação de dispositivos de medição, atuação e controle. Proposta de projeto submetida ao subprograma de instrumentação do PADCT - Chamada SINST 01/89-02. Florianópolis (BR), out. 1989.

[AGUI288] AGUIAR, M. W. C. de & FRITZKE Jr, U. Rede de Petri como ferramenta de modelagem - Documento Interno nº 02, CERTI/LCMI, Florianópolis (BR), jul. 1988.

[AGUI188] AGUIAR, M. W. C. de. O "Field-bus" dentro das comunicações na fábrica: Análise da proposta "FIP". Documento Interno nº 01, CERTI/LCMI, Brasil, jun. 1988.

7. ANEXOS

SUMÁRIO DO ANEXO

| | |
|---|----|
| 7.1 - Análise temporal dos serviços do PROFIBUS E DO FIP... | 2 |
| 7.1.1 - PROFIBUS..... | 2 |
| 7.1.1.1 - Envio de informação com reconhecimento (SDA)... | 2 |
| 7.1.1.2 - Envio de informação sem reconhecimento (SDN)... | 5 |
| 7.1.1.3 - Leitura remota de informação (RDR)..... | 7 |
| 7.1.1.4 - Intercâmbio de informação (SRD)..... | 9 |
| 7.1.1.5 - Leitura periódica remota de informação e intercâmbio periódico de informação (CRDR e CSRD)..... | 9 |
| 7.1.1.6 - Transferência do "token" (TOK)..... | 15 |
| 7.1.2 - FIP..... | 18 |
| 7.1.2.1 - Leitura, Escrita e transferência de "buffer" (TB)..... | 18 |
| 7.1.2.2 - Requisição explícita de transferência de "buffer" (Serviço aperiódico - UP/RETB)..... | 21 |
| 7.1.2.3 - Requisição de transferência de mensagem sem reconhecimento (SDN)..... | 24 |
| 7.1.2.4 - Requisição de transferência de mensagem com reconhecimento (SDA)..... | 26 |
| 7.1.2.5 - Ciclo elementar..... | 31 |
| 7.2 - Redes de Petri (RdP)..... | 34 |
| 7.2.1 - RdP - Predicado (RdP)..... | 34 |
| 7.2.2 - RdP - Temporizada e com temporização..... | 36 |
| 7.2.3 - RdP - Temporizadas Extendidas (RdPTE)..... | 37 |
| 7.3 - Descrição Sucinta do ARP..... | 40 |

| | |
|--|----|
| 7.4 - Modelos em RdPTE..... | 42 |
| 7.4.1 - PROFIBUS..... | 42 |
| 7.4.1.1 - Serviços RDR/SRD (SDA/RDR/SRD)..... | 42 |
| 7.4.1.2 - Serviço SDN..... | 42 |
| 7.4.1.3 - Serviços CRDR e CSRD (P)..... | 43 |
| 7.4.1.4 - Transferência do "token" (TOK)..... | 45 |
| 7.4.1.5 - Rotação e utilização do "token"..... | 47 |
| 7.4.1.6 - Multiplicidade de transações aperiódicas e de mensagem (MUP/M)..... | 47 |
| 7.4.1.7 - Serviço periódico combinado (P + TTH)..... | 50 |
| 7.4.1.8 - Serviços periódico, aperiódico e de mensagem combinados..... | 50 |
| 7.4.2 - FIP..... | 52 |
| 7.4.2.1 - Serviço de transferência de "Buffer" (TB)..... | 52 |
| 7.4.2.2 - Serviço requisição explícita de transferência de "buffer" (IDRQ)..... | 54 |
| 7.4.2.3 - Serviço SDN (MN)..... | 56 |
| 7.4.2.4 - Serviço SDA (MA)..... | 56 |
| 7.4.2.5 - Serviço periódico (P)..... | 58 |
| 7.4.2.6 - Serviço de mensagem (SDA/SDN - M)..... | 59 |
| 7.4.2.7 - Serviço aperiódico (UP)..... | 60 |
| 7.4.2.8 - Ciclo elementar (SR)..... | 62 |

ÍNDICE DE FIGURAS DO ANEXO

| | | |
|------|--|----|
| 7.1 | - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço SDA..... | 3 |
| 7.2 | - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço SDN..... | 6 |
| 7.3 | - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço RDR..... | 8 |
| 7.4 | - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço SRD..... | 10 |
| 7.5 | - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço CRDR..... | 11 |
| 7.6 | - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço CSRD..... | 16 |
| 7.7 | - PROFIBUS - Diagrama de barras da transferência do "token"..... | 17 |
| 7.8 | - FIP - Diagrama de barras do serviço TB..... | 19 |
| 7.9 | - FIP - Diagrama de barras do serviço UP..... | 22 |
| 7.10 | - FIP - Diagrama de barras do serviço SDN..... | 25 |
| 7.11 | - FIP - Diagrama de barras do serviço SDA..... | 27 |
| 7.12 | - FIP - Diagrama de barras do ciclo elementar..... | 32 |
| 7.13 | - Redes de Petri (RdP)..... | 35 |
| 7.14 | - Diagrama de blocos de ARP [MAZ189]..... | 40 |
| 7.15 | - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do serviço SDN [PROFISDN]..... | 43 |
| 7.16 | - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do serviço periódico [PROFIP]..... | 44 |
| 7.17 | - PROFIBUS - Modelo em RdPTE da transferência do "token" [PROFITOK]..... | 46 |
| 7.18 | - PROFIBUS - Modelo em RdPTE de rotação do "token" [PROFITRR]..... | 48 |
| 7.19 | - PROFIBUS - Modelo em RdPTE de utilização do "token" [PROFITTH]..... | 48 |
| 7.20 | - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do serviço de mensagem e aperiódico [PROFIUP/M]..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 7.21 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do modelo mais completo [PROFISR]..... | 51 |
| 7.22 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço TB/SDN [FIPTB/MN]... | 53 |
| 7.23 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço UP [FIPIDRQ]..... | 55 |
| 7.24 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço SDA [FIPMA]..... | 57 |
| 7.25 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço periódico [FIPP].... | 58 |
| 7.26 - FIP - Modelo em RdPTE da janela de mensagem [FIPM]... | 59 |
| 7.27 - FIP - Modelo em RdPTE da janela aperiódica [FIPUP]... | 61 |
| 7.28 - FIP - Modelo em RdPTE do ciclo elementar completo [FIPCE]..... | 63 |

7.1 ANÁLISE TEMPORAL DOS SERVIÇOS DO PROFIBUS E DO FIP

Este item apresentará a aplicação do modelo da figura 3.3 e 3.4 e uma descrição matemática dos tempos de usuário associados, para cada serviço da camada enlace.

Serão definidos primeiramente, os tempos de serviço (t_{S}), onde "S" identificará a sigla do serviço, para facilitar a representação das equações.

7.1.1 PROFIBUS

7.1.1.1 Envio de informação com reconhecimento (SDA)

A figura 7.1 apresenta as transações do serviço SDA para quatro condições distintas do serviço:

- bem sucedido, com a transferência efetivada (a);
- sem erros, mas sem a efetivação da transferência (erro na entidade remota) (b);
- mal sucedido (c);
- bem sucedido, mas com uma retransmissão e eventual erro por duplicação, a nível do usuário da camada enlace (d).

Na última condição é importante notar que, a nível da camada enlace, o mecanismo bit alternado é suficiente para evitar erros de duplicação. Contudo, o número limitado de tentativas de retransmissão permite a ocorrência da duplicação.

USUÁRIO LOCAL

ENLACE

USUÁRIO REMOTO

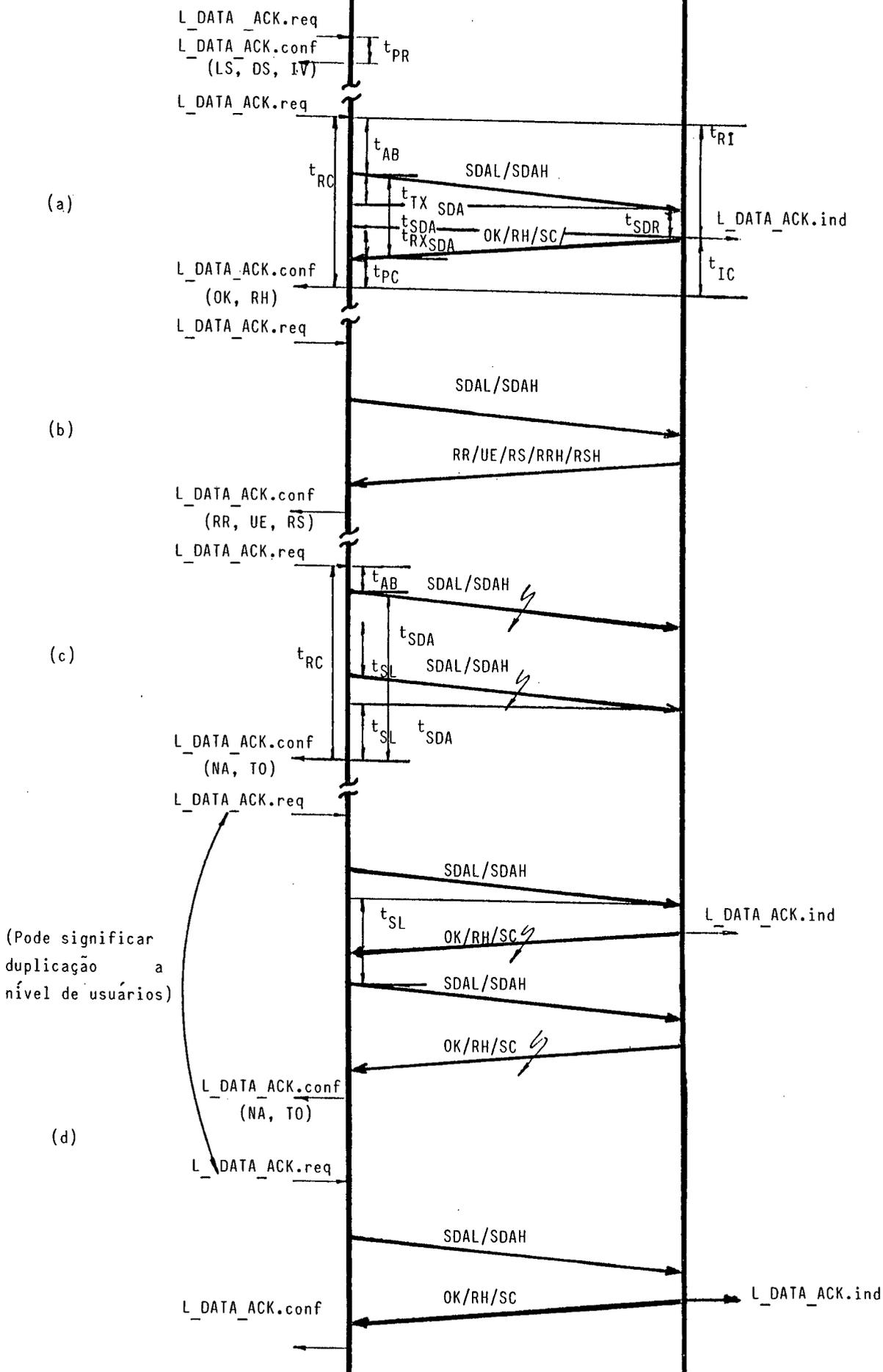


FIGURA 7.1 - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço SDA

Este erro pode ser evitado pelo usuário local se, após a ocorrência de uma transmissão mal sucedida e antes de enviar uma nova informação útil, o usuário local enviar um "frame" de informação vazio, para sincronizar os contadores FCB/FCV (fig. 3.8).

a. t_{SD} :

- serviço SDA bem sucedido:

-----!
 $t_{SDA} = t_{ID} + t_{TF} + t_{RF} + t_{ORD} + 2.t_{TD}$!, sem retransmissões;
 -----!

-----!
 $t_{SDA} = 2.(t_{ID} + t_{TF} + t_{TD}) + t_{RF} + t_{ORD} + t_{SL}$!, com uma
 -----!

retransmissão devido o "frame" de transmissão não íntegro;

-----!
 $t_{SDA} = 2.(t_{ID} + t_{TF} + t_{RF} + t_{ORD} + 2.t_{TD})$!, com uma
 -----!

retransmissão devido o "frame" de recepção não íntegro;

- serviço SDA mal-sucedido:

-----!
 $t_{SDA} = 2.(t_{ID} + t_{TF} + t_{SL})$!, com duas tentativas por
 -----!

"frames" de transmissão não íntegro;

-----!
 $t_{SDA} = 2.(t_{ID} + t_{TF} + t_{RF} + t_{ORD} + 2.t_{TD})$!, com duas
 -----!

tentativas por "frame" de recepção não íntegro;

$$!t_{EDA} = 2.(t_{ID} + t_{TF} + t_{TD}) + t_{RF} + t_{EDR} + t_{EL}!, \text{ com uma}$$

tentativa por "frame" de transmissão e outra por "frame" de recepção não íntegros;

b. t_{RC} :

$$!t_{RC} = t_{AB} + t_{EDA} + t_{EC}!$$

c. t_{RI} : (significado restrito aos serviços bem sucedidos):

$$!t_{RI} = t_{AB} + t_{EDA}' + t_{EI}!,$$

onde:

$t_{EDA}' = t_{EDA}$ quando a transação é bem sucedida na primeira tentativa, do ponto de vista do "respondedor", e na segunda tentativa, do ponto de vista do "iniciador".

= t_{EDA} , na ausência de erros.

7.1.1.2 Envio de informação sem reconhecimento (SDN)

A figura 7.2 apresenta as transações do serviço SDN para duas condições distintas:

- com transferência efetiva de informação (a);
- sem transferência efetiva de informação (b).

d. Tempo entre as primitivas "indication" de duas estações receptoras em uma transação SDN de difusão (t_{II}):

$$t_{II} = t_{SDN1} - t_{SDN2} + t_{PC1} - t_{PC2}$$

$$t_{II} = t_{TD1} - t_{TDE} + t_{PC1} - t_{PC2} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot f \cdot (d1) + t_{PC1} - t_{PC2}$$

onde $d1$ é a distância entre as estações receptoras.

O valor máximo para t_{II} , fica:

$$\begin{array}{l} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{II\max} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot f \cdot d1 + (t_{PC1\max} - t_{PC2\min}) \text{ !} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

7.1.1.3 Leitura remota de informação (RDR)

A figura 7.3 apresenta as transações do serviço RDR para quatro condições distintas:

- bem sucedido, com efetiva transferência de informação (a);
- sem erros, mas sem efetiva transferência de informação (b);
- mal sucedido (c);
- bem sucedido, com retransmissão (d).

Na última condição, o sucesso do serviço é reconhecido em transações distintas pelos usuários local e remoto, devido a retransmissão por perda da resposta.

Contudo, mesmo que ocorra uma atualização da variável na estação remota entre uma transmissão e uma retransmissão, não haverá a ocorrência de 2 "indication" para somente 1

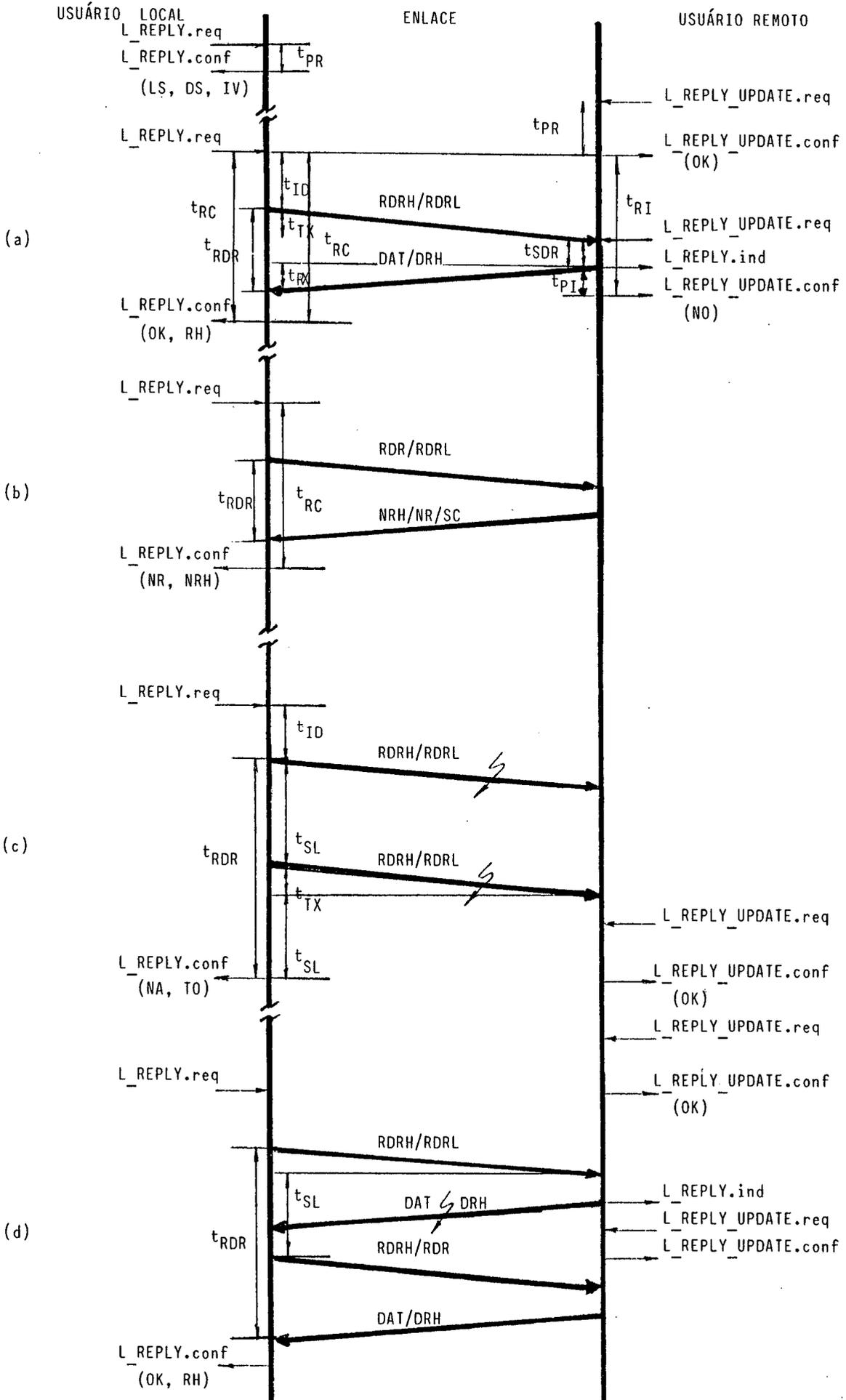


FIGURA 7.3 - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço RDR

"request", pois ocorre rejeição por duplicação, pela ação dos bits FCB/FCV. Este mecanismo exige que a informação seja mantida na estação remota, até a próxima operação com o usuário local em questão.

As equações e condições do serviço RDR são idênticas às dos serviço SDA, diferindo somente na aplicação dos valores de t_{RF} e t_{RF} .

7.1.1.4 Intercâmbio de informação (SRD)

A figura 7.4 apresenta as transações do serviço SRD, para as condições similares às descritas no serviço RDR, diferenciando-se na simetria das operações (escrita local) e em relação à transferência de informação nos usuário local e usuário remoto. É importante notar que o mecanismo de controle de duplicação opera do usuário local para o usuário remoto, mas não no sentido inverso.

As equações e condições dos tempos do serviço SRD são idênticas às do serviço RDR, diferindo somente na aplicação dos valores de t_{RF} .

7.1.1.5 Leitura periódica remota de informação e intercâmbio periódico de informação (CRDR e CSRD):

A figura 7.5 apresenta as transações do serviço CRDR, à partir da utilização periódica do serviço RDR, sendo que as mesmas condições de um serviço RDR em particular são aplicáveis a uma transação individual do serviço CRDR.

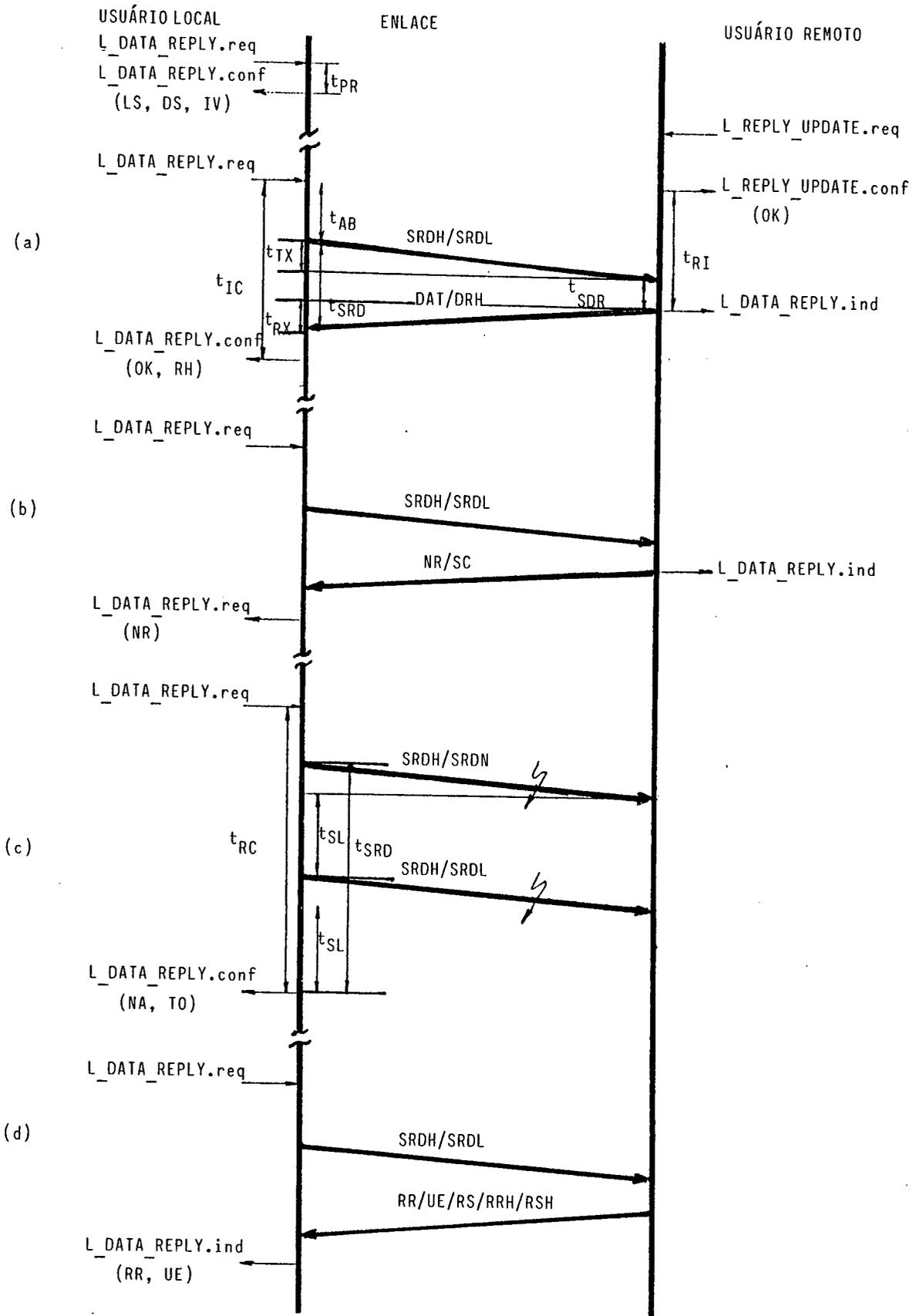


FIGURA 7.4 - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço SRD

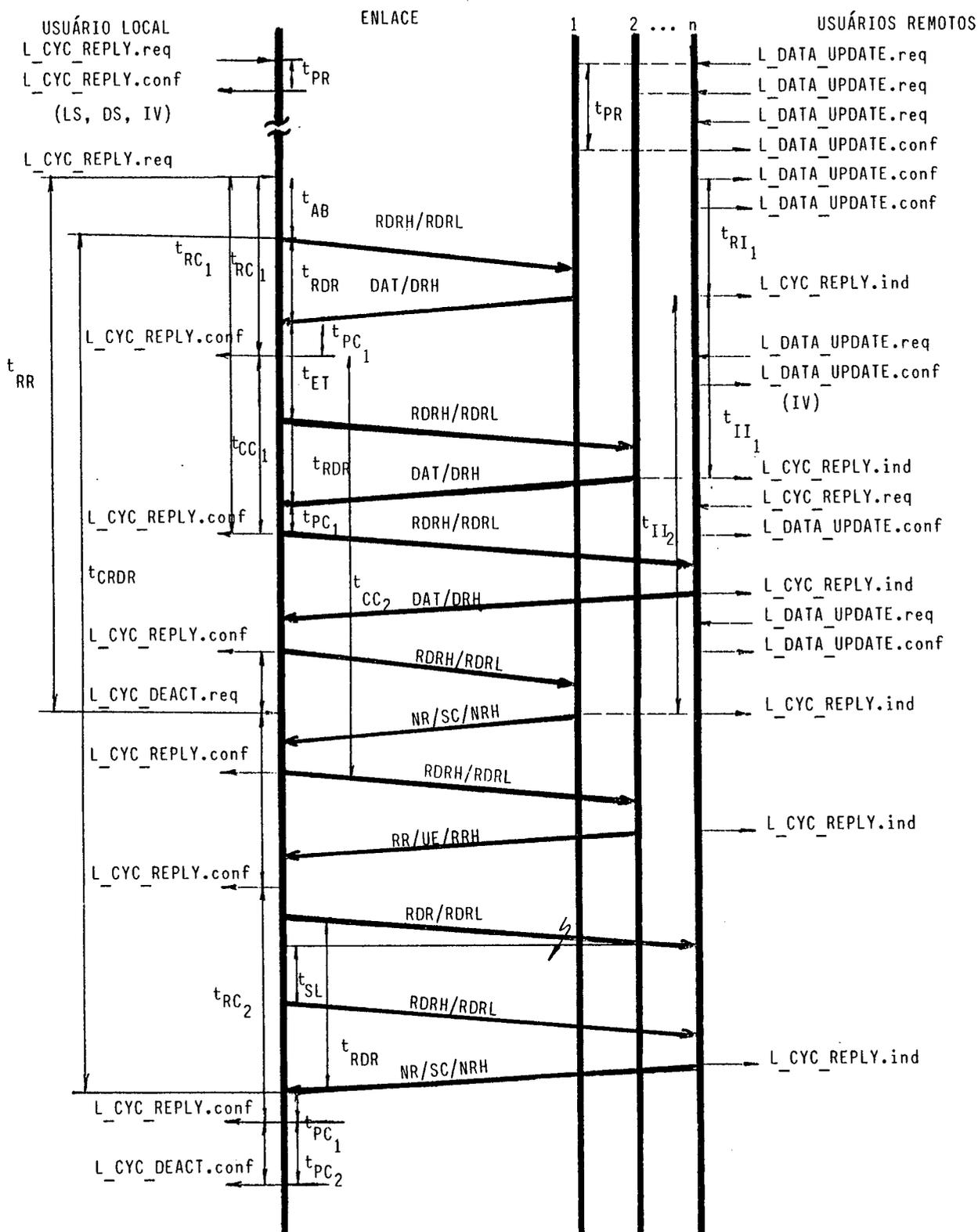


FIGURA 7.5 - PROFIBUS - Diagrama de barras do serviço CRDR

O serviço periódico executa as transações RDR da Poll_list indefinidamente, até a sua desativação, após a conclusão da varredura Poll_list que estiver em execução.

a. Tempo de um serviço CRDR completo:

$$t_{CRDR} = \sum_{i=1}^{n_p} t_{RDRi} + \sum_{i=1}^{n_p} t_{ETi}$$

onde: t_{RDRi} , t_{ETi} e n_p estão definidos no item 3.2, sendo que:

- t_{RDRi} é obtido dos resultados do serviço RDR.
- $t_{ETi} = t_{AR} = t_{PR} + t_{AT} + t_{EP}$

b. Tempo entre a primitiva "request" de ativação do serviço e a j-ésima primitiva "confirm" (da transação RDRj):

$$t_{RCj} = t_{AR} + \sum_{i=1}^j t_{RDRi} + \sum_{i=1}^j t_{ETi} + t_{PCj}$$

para $j = 1$

$$t_{RC1} = t_{AR} + t_{RDR1} + t_{PC1}$$

c. Tempo entre as primitivas "request" de ativação do serviço e a j-ésima primitiva "indication" (da transação RDR_j):

$$t_{RIj} = t_{AR} + \sum_{i=1}^j t_{RDRI} + \sum_{i=1}^j t_{ETI} + t_{PIj}$$

d. Tempo entre primitivas "confirm" consecutivas (onde "j" indica a transação relativa à primeira primitiva "confirm"):

$$t_{COj} = t_{DR} + t_{ET} + t_{PC} - t_{PC1}$$

j
(j-1)
j
(j-1)

e. Tempo entre as primitivas "request" de ativação e "confirm" de desativação do serviço periódico:

$$t_{RCR} = t_{AR} + \sum_{i=1}^m t_{ORDRI} + t_{PC1} + t_{PCR}$$

onde "m" indica o número de vezes que a Poll_list foi varrida.

- f. Tempo entre duas primitivas "confirm" consecutivas relativas a uma dada variável da "Poll_list":

$$t_{\text{CCR},j} = \sum_{i=j}^{n_p+j} t_{\text{RDR}i} + \sum_{i=j}^{n_p+j} t_{\text{ET}i}$$

- g. Tempo entre duas primitivas "indication" consecutivas, relativas a uma dada variável da "Poll_list" (se ambas as transações foram bem sucedidas):

$$t_{\text{IR},j} = \sum_{i=j}^{n_p+j} t_{\text{RDR}i} + \sum_{i=j}^{n_p+j} t_{\text{ET}i}$$

Dessas equações observa-se que as restrições de uniformidade (t_p) e periodicidade (t_{PR}) do serviço periódico dizem respeito a t_{CCR} e t_{IR} , que estão diretamente relacionados com t_{RDR} e dependem de t_{ET} . t_{ET} , por sua vez, depende de t_{RR} e da estratégia de varredura da Poll_list. Com isso, interferem na regularidade dos valores de t_{CCR} e t_{IR} :

- o instante de ativação do serviço periódico;
- o volume de serviços precedentes de mais alta prioridade em relação ao t_{TH} disponível;
- a dimensão da Poll_list em relação ao t_{TH} disponível;
- eventuais rotações do "token" entre os serviços RDR individuais (t_{ET} incluindo t_{RR} 's).

Uma estratégia recomendada [SIEM88] para utilização do serviço periódico é ativá-lo e imediatamente em seguida desativá-lo, para que a Poll_list só seja executada uma vez e a ativação seguinte fique a critério do usuário.

Contudo, este controle não resolve o problema da concorrência do serviço com a rotação do "token", nem restringe as variações decorrentes da concorrência com outros serviços, ativados por distintas entidades de aplicação. Adicionalmente, este controle transcende o escopo da camada enlace, estando em um nível intermediário entre os usuários da camada enlace (entidades de aplicação) e a referida camada.

As mesmas considerações quanto ao serviço CRDR são válidas para o serviço CSRD (figura 7.6), ressalvadas as diferenças entre os serviços SRD e RDR.

7.1.1.6 Transferência do "token" (TOK)

A figura 7.7 representa as transações a nível MAC para a transferência do "token", para algumas condições de operação:

- bem sucedida (a);
- mal sucedida e procura pela estação seguinte à NS (b);
- varredura da GAP_list para manutenção do anel lógico (d).

Não foram representados:

- perda do "token" e decorrente "token time-out";
- varredura da LMS, até a TS concluir que é a única estação no anel lógico;
- duplicação do "token".

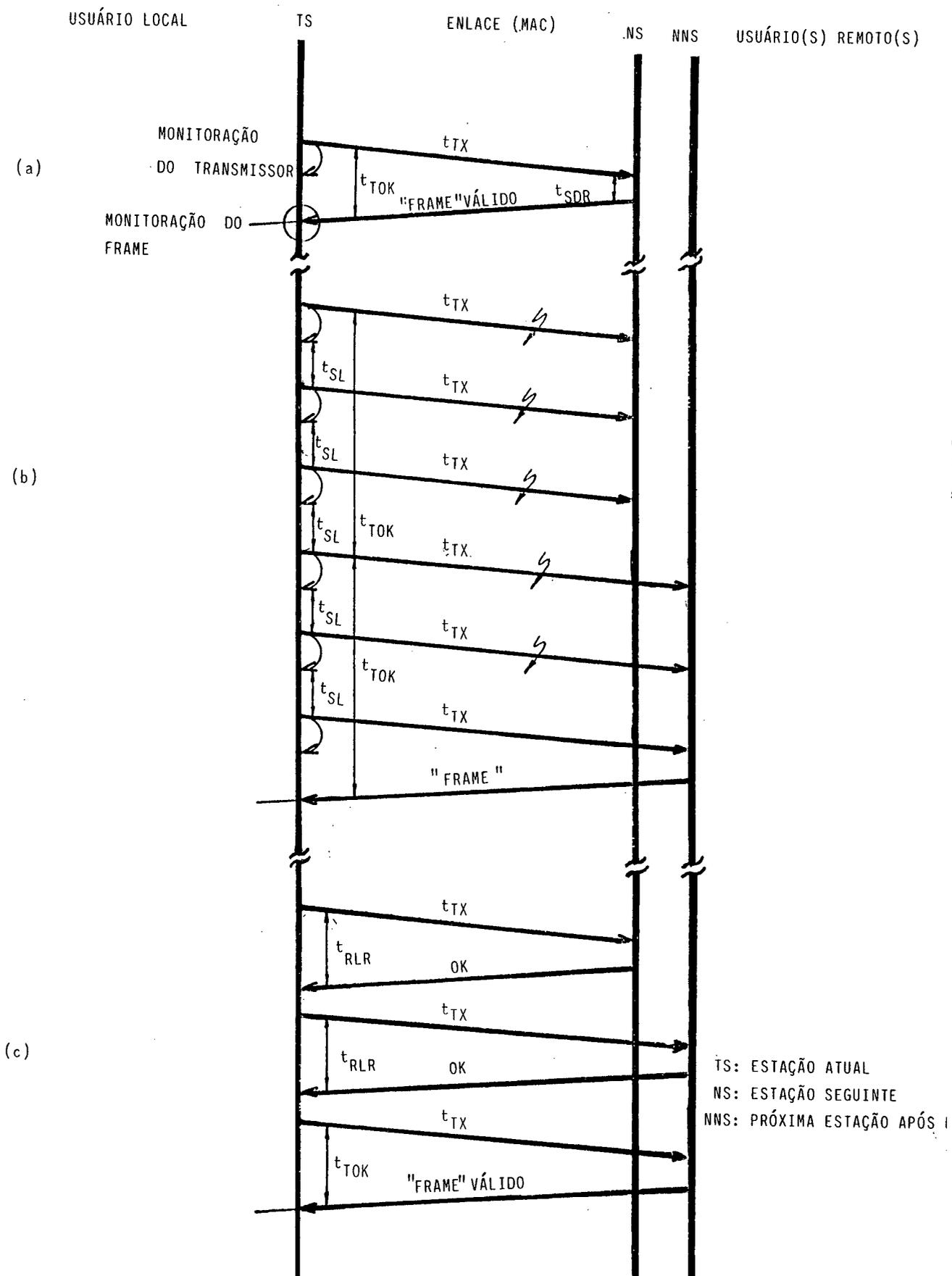


FIGURA 7.7 - PROFIBUS - Diagrama de barras da transferência do "token"

a. Tempo de uma transferência de "token" bem sucedida:

$$!t_{\text{OK}} = t_{\text{ID}} + 2.t_{\text{TD}} + t_{\text{TF}} + t_{\text{CAR}} !, \text{ sem retransmissões;}$$

$$!t_{\text{OK}} = (1 + n_r).(t_{\text{ID}} + t_{\text{TF}}) + n_r.t_{\text{EL}} + t_{\text{TD}} + t_{\text{CAR}} !, \text{ com até}$$

n_r retransmissões;

onde n_r é o número máximo de tentativas de transferir o "token"

b. Tempo de uma transferência de "token" mal-sucedida:

$$!t_{\text{OK}} = n_r.(t_{\text{ID}} + t_{\text{TF}} + t_{\text{EL}}) !$$

7.1.2 FIP

Neste item serão, a exemplo do PROFIBUS, definidos inicialmente os tempos t_s de cada serviço, onde "S" indicará a sigla do serviço em questão ou a sua fase. Adicionalmente, será adotada a notação t_{PDU} para indicar o tempo de transmissão dos "frames", onde "PDU" é a sigla do "frame" (fig. 3.18).

7.1.2.1 Leitura, Escrita e Transferência de "Buffer" (TB)

A figura 7.8 apresenta as transações do serviço para 2 condições distintas:

- sem erro (a);

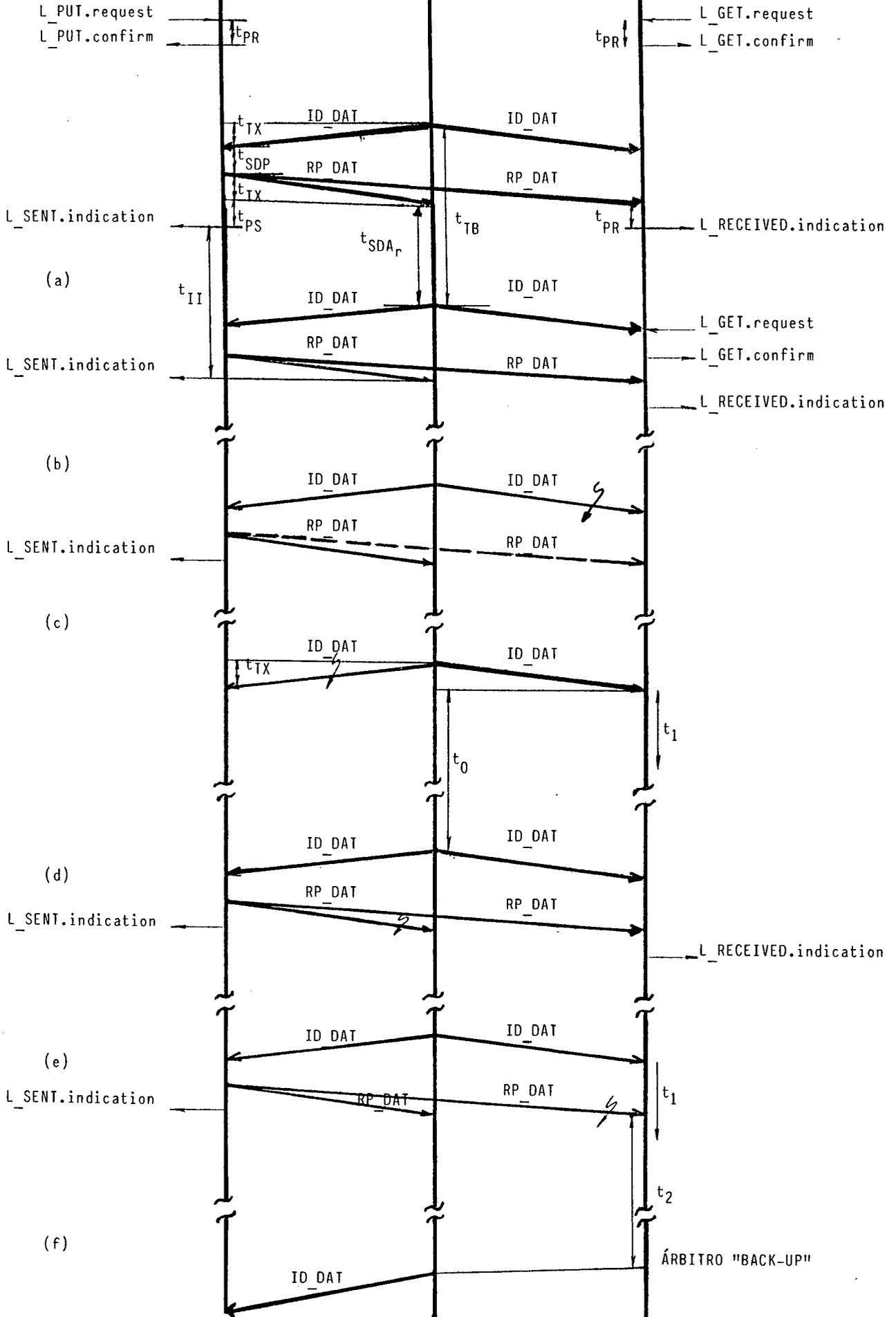


FIGURA 7.8 - FIP - Diagrama de barras do serviço TB

- com erro, nos "frames":

- . ID_DAT entre A e C (b);
- . ID_DAT entre A e P (c);
- . RP_DAT entre P e A (d);
- . RP_DAT entre P e C (e).

É importante notar que essas condições de erro produzem a inconsistência espacial, decorrente da percepção de distintos resultados da execução dos serviços em estações distintas.

a. Tempo de uma transação de escrita/leitura:

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{PUT/GET} = t_{PR} \text{ !} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

b. t_B :

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{TB} = t_{BDAT} + t_{BDF} + t_{ID_DAT} + t_{RP_DAT} + 2 \cdot t_{TD} \text{ !, sem erros} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{TB} = t_{BDAT} + t_{BDF} + t_{ID_DAT} + t_0 \text{ !, com erro no "frame" ID_DAT} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

Para a condição de erro no "frame" RP_DAT, t_{TB} apresenta valores idênticos à transação sem erros.

c. t_P :

$$t_P = \sum_{i=1}^{n_P} t_{TBI}$$

d. t_{RC} e t_{RI} : não têm significado, pois o serviço TB não é ativado pelo usuário da camada enlace.

7.1.2.2 Requisição Explícita de Transferência de "Buffer"

(Serviço aperiódico - UP/RETB):

A figura 7.9 apresenta as transações do serviço UP nas suas diversas fases. As fases executadas em janelas distintas ocorrem sem uma relação rígida de tempo entre elas (t_{ET} na figura 3.4), que culmina com a transferência de cada variável em transações TB.

a. Tempo de uma transação UP:

Uma transação completa UP compreende 4 fases:

- solicitação do serviço pelo usuário e transferência da solicitação do produtor/consumidor para o árbitro no serviço periódico (a);
- repasse da lista ao árbitro no serviço de transferência de lista de variáveis (b);
- efetiva atualização das variáveis por serviços TB (c).

As fases (a) e (c) são serviços TB e os seus tempos individuais são calculados conforme o item anterior.

A fase (d) é calculada como segue (IDRQ):

$$t_{IDRQ} = t_{DAR} + t_{DR} + t_{ID_RQ} + t_{TR_RQ} + 2.t_{TP}$$

sendo $t_{TR_RQ} = 43 + 16.nIDa$ [bit], onde $nIDa$ é o número de identificadores a serem transferidos, presentes na lista.

O tempo total efetiva execução do serviço t_{UP} , considerando as fases (b) e (c)

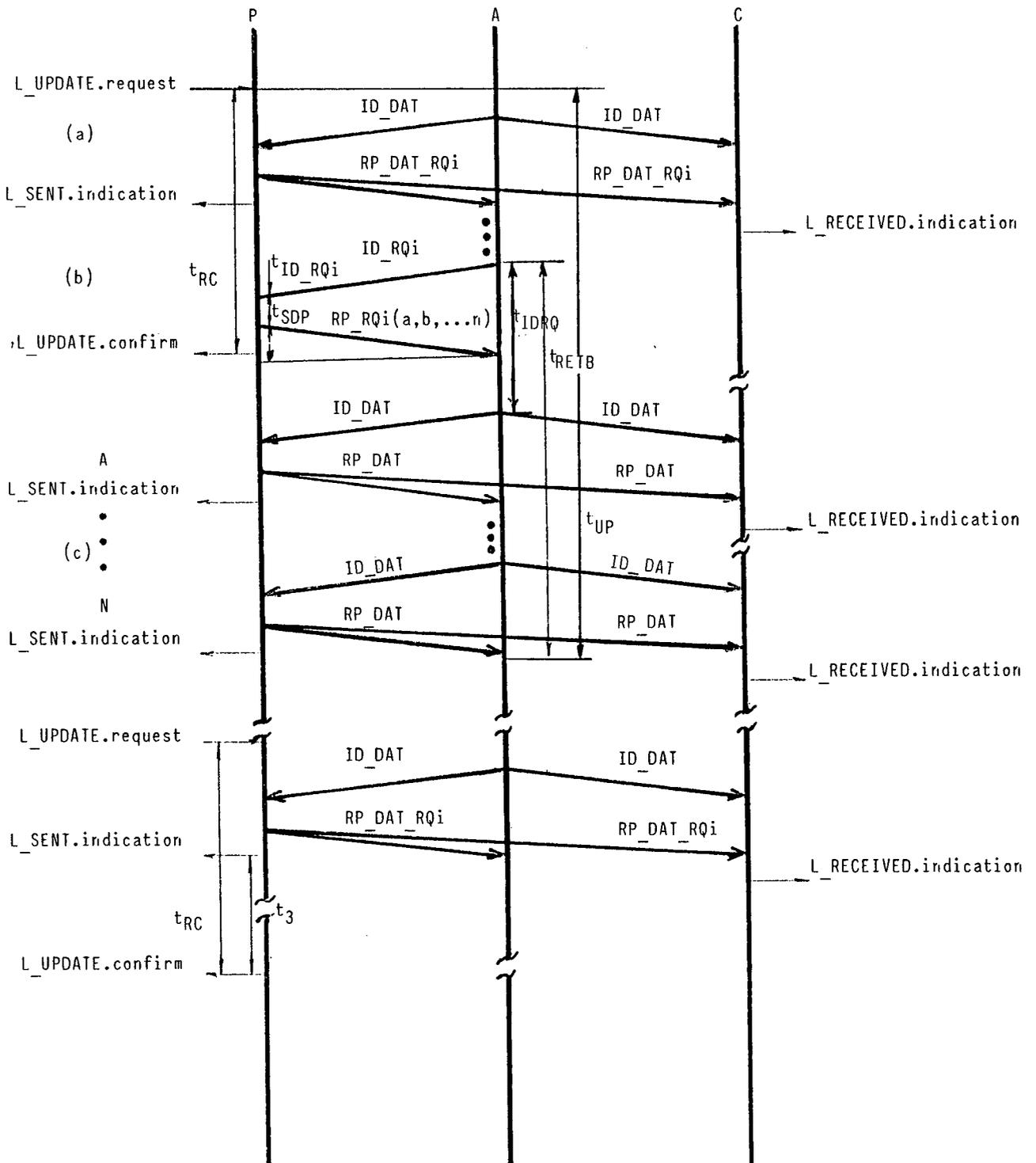


FIGURA 7.9 - FIP - Diagrama de barras do serviço UP

$$t_{RETB} = t_{IDRO} + \sum_{i=1}^{nIDa} t_{TBI}$$

Todas essas relações são válidas somente se não houver presença de erros. Na presença de erros em quaisquer das fases, as fases seguintes não são executadas.

b. t_{RO} :

$$t_{RO} = t_{AB} + t_{IDRO}$$

c. Tempo total entre a primitiva "request" e a execução da última transação TB associada (t_{UP}):

$$t_{UP} = t_{AB} + t_{RETB}$$

t_{UP} pode variar grandemente devido a t_{AB} .

d. t_{RI} :

t_{RI} inexistente para o serviço como um todo, pois as primitivas "indication" existentes são aquelas relacionadas com os serviços TB de transferência da lista de variáveis. Para a última primitiva "indication" da lista:

$$t_{RI} = t_{UP}$$

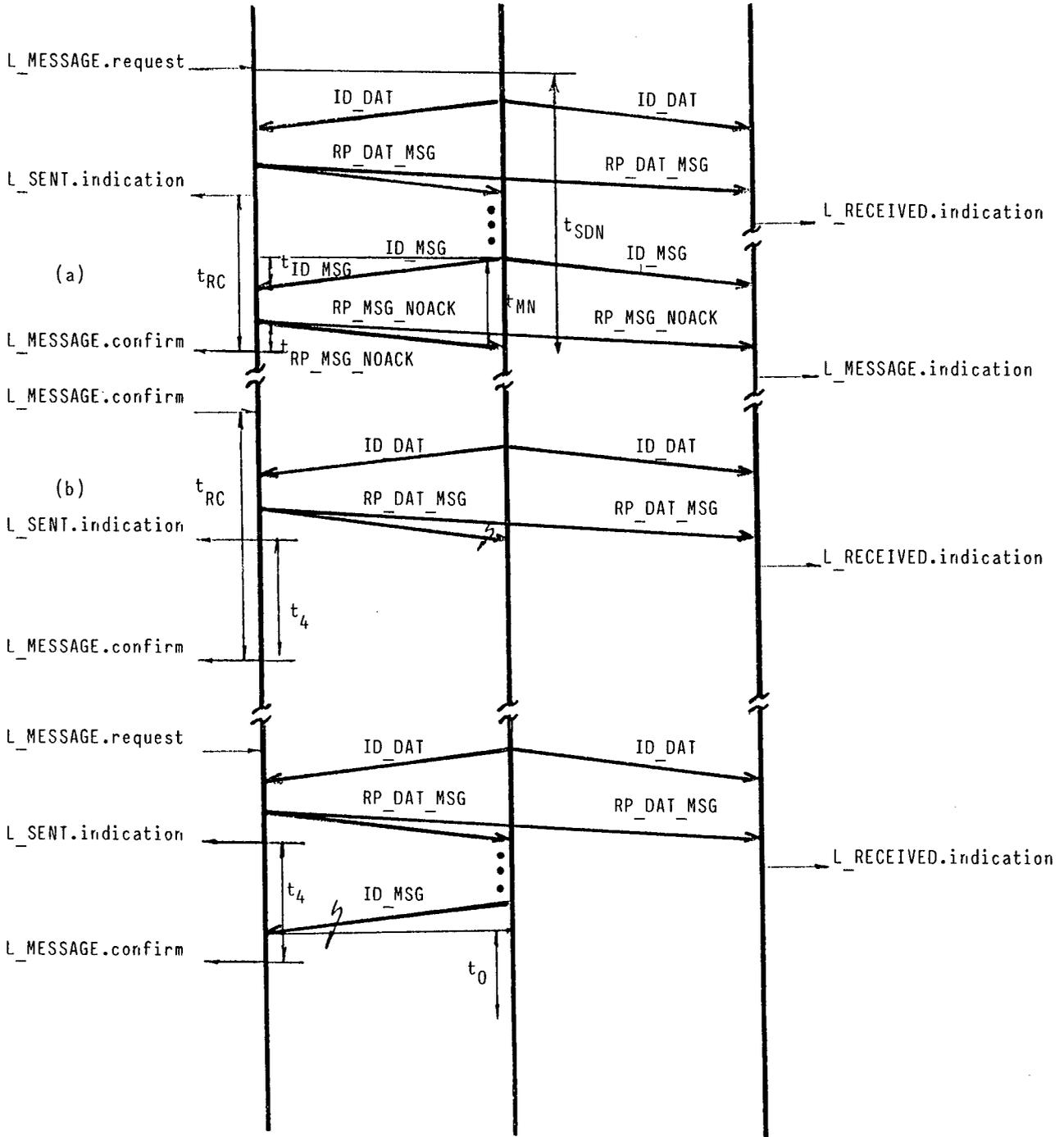


FIGURA 7.10 - FIP - Diagrama de barras do serviço SDN

c. t_{RX} :

```
!-----!  
!tRX = tODN!  
!-----!
```

7.1.2.4 Requisição de transferência de mensagem com reconhecimento (SDA)

A figura 7.11 apresenta as transações do serviço SDA nas suas 3 fases (indicadas no item 7.1.2.3), para 3 condições distintas:

- sem erro (a);
- com erro no RP_ACK entre C e P (b);
- sucessivos erros no RP_ACK entre o consumidor e o árbitro (c).

As mesmas considerações tecidas em 7.1.2.1 são cabíveis para as segunda e terceira condições, quanto à inconsistência dos resultados das transações em distintas estações, sendo que no serviço SDA esta inconsistência é mais crítica.

Na última transação, a recepção de um RP_MSG_ACK com erro pelo árbitro não interfere no resultado final da transação, se um RP_ACK é recebido com sucesso. Se um RP_ACK for recebido corretamente pelo produtor, mas não o for pelo árbitro, o serviço é reexecutado. Se ocorrer o inverso, o árbitro assume que o serviço foi bem sucedido.

Esta problemática está relacionada com a não coincidência da entidade de controle de acesso ao meio físico (árbitro) com a entidade produtora. Árbitro e produtor, residindo em estações distintas, têm distintas visões dos resultados do serviço.

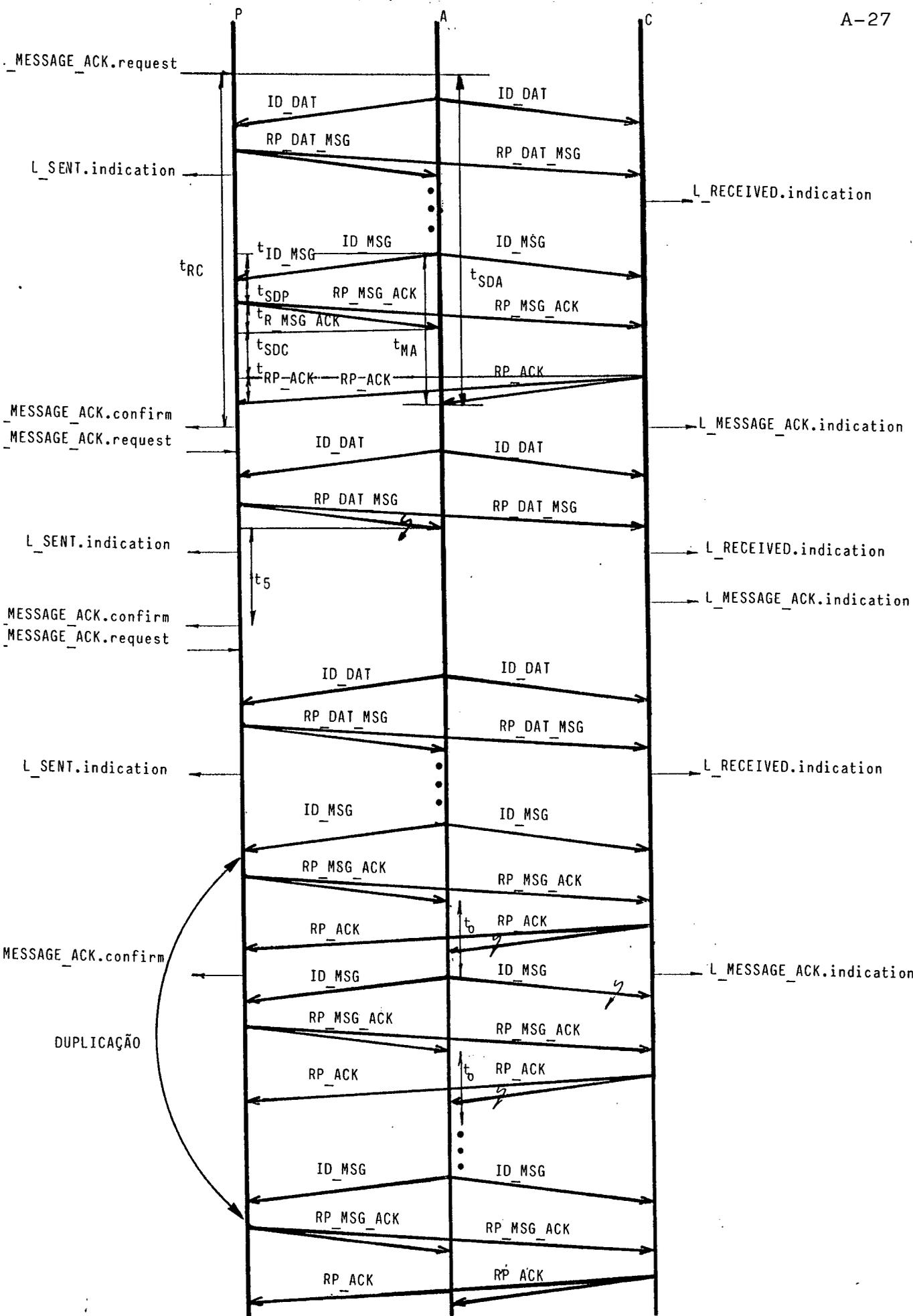


FIGURA 7.11 - FIP - Diagrama de barras do serviço SDA

Como a garantia de efetiva transferência é de interesse primeiro do produtor e ao árbitro interessa somente reconhecer o sucesso do serviço, sem necessariamente receber a informação sem erros, a seguinte alteração [FIP89] foi introduzida nas especificações do FIP [THOM187] [THOM88].

Nesta proposta o árbitro opera da seguinte forma:

- difunde um ID_MSG;
- espera durante t_0 pelo início da transmissão de um RP_MSG_ACK do produtor;
- espera durante t_0 pelo início da transmissão de um RP_ACK do consumidor;
- espera durante t_0 pelo início da transmissão de um RP_FIM ("frame" introduzido para ser gerado pelo produtor para o árbitro, para indicar o sucesso do serviço).

Em todas as transações posteriores ao ID_MSG o árbitro avalia somente a ocupação do meio físico pelo produtor/consumidor antes de decorrer t_0 , sem se ocupar da integridade dos "frames".

Uma segunda alternativa para a problemática de inconsistência, consiste em se deixar ao encargo do produtor o controle de repetição do serviço, através de uma nova solicitação RP_DAT_MSG ao árbitro, na janela periódica seguinte caso, decorrido t_{cs} , não tenha recebido um RP_ACK.

As equações matemáticas das temporizações para o serviço SDA considerarão a primeira alternativa (inclusão da transação RP_FIM).

- Tempo de uma transação SDA (fase de efetiva transferência da mensagem - MA):

O sucesso do serviço SDA está estreitamente relacionado com a não expiração do número máximo de retransmissões pelo árbitro. Como as especificações FIP não definem o número máximo de retransmissões (n_r) do serviço, se adotará $n_r = 1$, para manter uma equivalência com o PROFIBUS. Assim, uma transação SDA bem sucedida implica na ocorrência de, no máximo, uma retransmissão.

As seguintes condições de erros implicam no disparo de t_o e decorrente retransmissão:

- (a) erro no "frame" ID_MSG entre A e P;
- (b) erro no "frame" ID_MSG entre A e C;
- (c) erro no "frame" RP_MSG_ACK entre P e C;
- (d) erro no "frame" RP_ACK entre C e P;

Como há possibilidade de uma única retransmissão, as condições de sucesso ou insucesso do serviço são seguintes:

. Transação MA bem sucedida:

$$!-----!
!t_{MA} = t_{ER} + t_{ID_MSG} + t_{EDP} + t_{RP_MSG_ACK} + t_{RP_ACK} + t_{EDF} + t_{RP_FIN} + t_{EDAR} + 4t_{TD}!
!-----!$$

sem retransmissões (t_{ER});

$$!-----!
!t_{MA} = t_{ER} + t_{ID_MSG} + t_o !, com uma retransmissão por (a);
!-----!$$

!-----!
 ! $t_{MA} = t_{ER} + t_{ID_MSG} + t_0$!, com uma retransmissão por (b)
 !-----!
 ou (c);

!-----!
 ! $t_{MA} = t_{ER} + t_{ID_MSG} + t_{DDF} + t_{RP_MSG_ACK} + t_0 + 2.t_{TD}$!, com
 !-----!

uma retransmissão por (d):

. Transação MA mal sucedida:

!-----!
 ! $t_{MA} = 2.(t_{ID_MSG} + t_0) = 2.t_{1R}$!, com duas retransmissões
 !-----!

por (a);

!-----!
 ! $t_{MA} = 2.(t_{ID_MSG} + t_{DDF} + t_{RP_MSG_ACK} + t_0 + 2.t_{TD}) = 2.t_{ER}$!
 !-----!

com duas retransmissões por (b) ou (c);

!-----!
 ! $t_{MA} = 2.(t_{ID_MSG} + t_{DDF} + t_{RP_MSG_ACK} + t_{DDC} + t_{RP_ACK} + t_0 + 3.t_{TD}) = 2.t_{ER}$!
 !-----!

com duas retransmissões por (d);

!-----!
 ! $t_{MA} = t_{1R} + t_{ER}$!, com uma retransmissão por (a) e outra
 !-----!
 por (b);

!-----!
 ! $t_{MA} = t_{1R} + t_{ER}$!, com uma retransmissão por (a) e outra
 !-----!
 por (d);

!-----!
 ! $t_{MA} = t_{ER} + t_{ER}$!, com uma retransmissão por (b) e outra
 !-----!
 por (d)

O tempo total (t_{TDA}), considerando-se as demais fases do serviço é:

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{TDA} = t_{AB} + t_{MA} \text{ !} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

b. t_{TRD} :

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{TRD} = t_{TDA} \text{ !} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

c. t_{TRI} :

$$\begin{array}{c} \text{!-----!} \\ \text{! } t_{TRI} = t_{TDA} \text{ !} \\ \text{!-----!} \end{array}$$

7.1.2.5 Ciclo elementar

A figura 7.12 apresenta um exemplo de um ciclo elementar, em suas janelas: periódica (transmissão e retransmissão), mensagem e aperiódica.

a. Serviço periódico:

O serviço periódico é implementado através das transações TB, que: são as únicas transações do FIP cujo tempo de acesso é garantido, não concorrem com outros serviços e não dependem do volume de informações em transferência.

b. Serviço aperiódico:

O serviço aperiódico é solicitado ao árbitro na janela periódica e é executado na janela aperiódica, segundo 2 filas

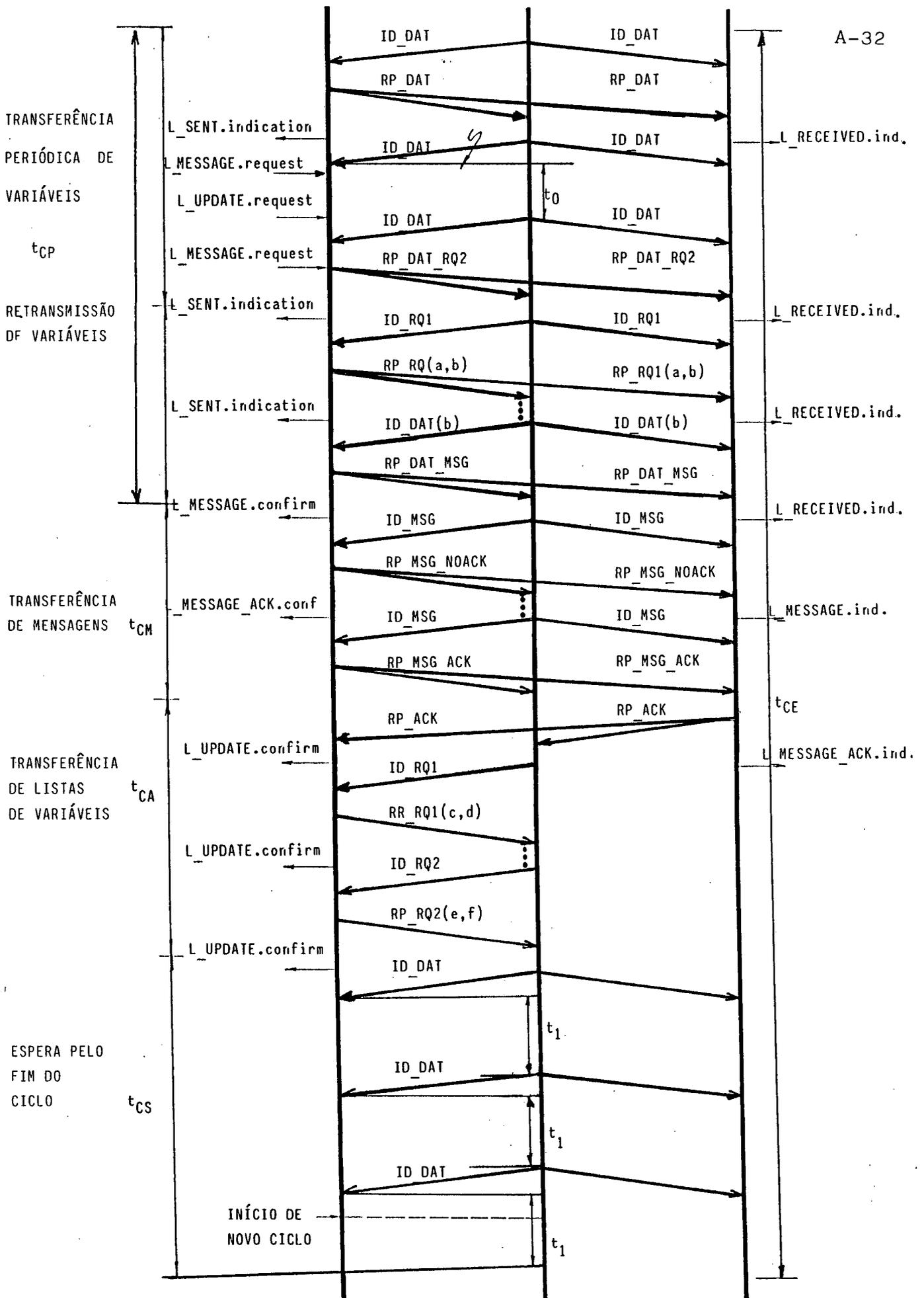


FIGURA 7.12 - FIP - Diagrama de barras do ciclo elementar

de prioridade, organizadas no árbitro: urgente e normal, sendo que as primeiras têm precedência sobre as segundas.

c. Serviço de mensagem:

Os serviços de mensagem com e sem reconhecimento não possuem resolução de prioridades, mas nas demais características são similares ao serviço periódico.

7.2 REDES DE PETRI (RdP)

A seguir são apresentados conceitos gerais introdutórios das RdP (fig. 7.13) Predicado-Ação, Temporizadas e Temporizadas Extendidas.

7.2.1 RdP Predicado - Ação

As RdP Predicado-Ação são RdP que têm associadas a cada transição uma expressão do tipo (figura 7.13.b):

"quando $P_t(x)$, faça $A_t(x)$ "

onde:

- $P_t(x)$ é o predicado associado a "t" que age sobre "x";
- $A_t(x)$ é a ação associada a "t" que é executada sobre "x".

Para uma transição "t" ser disparada é preciso que "t" esteja habilitada e que $P_t(x)$ seja verdadeiro. No disparo de "t" a ação $A_t(x)$ é executada, de forma indivisível.

No âmbito dos protocolos de comunicação, a representação do tipo RdP Predicado-Ação associada a transmissão de mensagem é de particular interesse. Uma notação específica foi introduzida para indicar ações de transmissão de uma mensagem M (!M) e predicados de recepção de uma mensagem M (?M). As RdP Predicado-Ação foram utilizadas no desenvolvimento dos modelos em RdP das entidades comunicantes em cada serviço e do meio físico, como um passo intermediário na construção dos modelos em RdPTE.

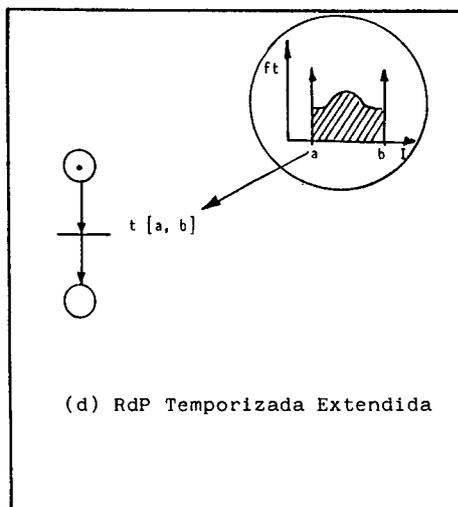
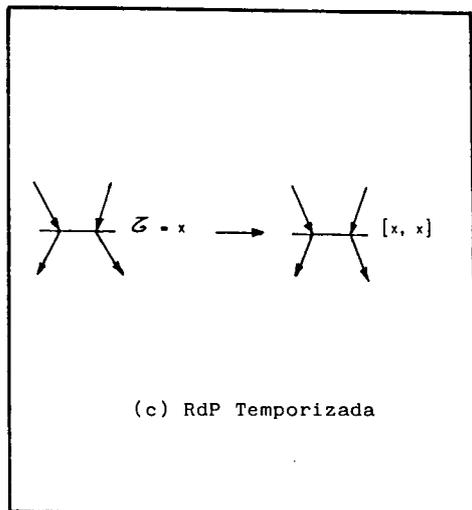
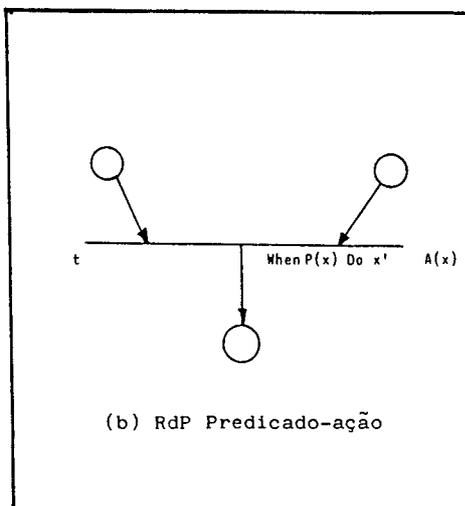
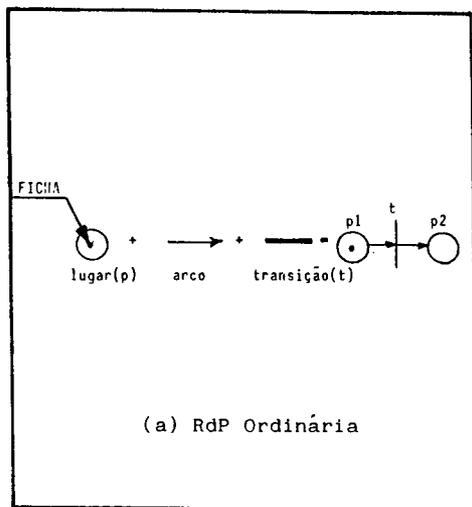


FIGURA 7.13 - Redes de Petri (RdP)

7.2.2 RdP Temporizada e com temporização

A RdP temporizada é uma extensão da RdP, que permite associar o tempo ao comportamento do sistema representado pela RdP. Dentre os modelos de RdP temporizadas [MENAB71], as Time Petri Net (TPN), são as mais gerais (fig.7.13.c), tendo sido propostas por Merlin em 1974. As TPN associam a cada transição um intervalo de tempo $[a, b]$ ($0 < a < b$, b não limitado) dentro do qual a transição deverá ser disparada, medido do instante em que foi habilitada.

- $\langle P, T, I, O, \theta \rangle$

- $\theta = [a_i, b_i]$ a cada $t_i \in T$, $0 < a_i < b_i$, $b_i \in [0, \infty]$

intervalo estático de disparo de t_i

a_i (EFT estático): tempo estático mínimo de disparo

b_i (LFT estático): tempo estático máximo de disparo

LFT - EFT: intervalo estático de disparo da transição

estados: $S(M, J)$

J : intervalo de tempo dinâmico de disparo da

transição = $b_i - a_i$

O disparo de uma transição t em um tempo θ de um estado S

= (M, J) , ocorrerá se:

- t é habilitado por M ;

- θ está compreendido entre EFT e LFT

Ao ser disparada; o estado passa a $S' = (M', J')$ onde:

$$M' = M(p) - I(t, p) + O(t, p)$$

- J'_k : - vazio, para as transições não habilitadas por M'
- para todas as transições k habilitadas por M e não em conflito com t (deslocamento para a origem e truncamento de valores negativos:
- $$J'_k = \max(0, EFT_k - \theta)$$
- EFT_n, LFT_n são os limites de J_k
- todas as demais transições tem seu intervalo de disparo igual ao intervalo estático (habilitadas por M' e em conflito com t ou não habilitadas por M).

7.2.3 RdP Temporizadas Extendidas (RdPTE)

As RdPTE são uma extensão das TPN, na qual uma função densidade de probabilidade é associada ao intervalo $[a_i, b_i]$ de disparo das transições da TPN (fig. 7.13.d).

A RdPTE é o par:

$$RdPTE = \langle TPN, FO \rangle$$

onde:

$$FO: Tr \rightarrow F^*$$

$$t_j \rightarrow t_j(x) = 0 \text{ se } x \notin [a_j, b_j]$$

$$> 0 \text{ se } x \in [a_j, b_j]$$

$$\forall j, 1 < j < n \text{ e } \int_{a_j}^{b_j} f_j(x) \cdot dx = 1$$

F_0 é a função densidade de probabilidade de disparo inicial (F^+ é o conjunto das funções não negativas).

Os estados em RdPTE são triplas $S = (M, I, F)$, consistindo de:

- função marcação M que satisfaz ($\forall p \in P, M(p) \geq 0$);
- função intervalo de disparo I , que associa a cada transição da rede um intervalo de tempo dentro do qual a transição é habilitada para disparo ($\forall t \in T, (I(t) = 0$ se t não é habilitada),
- função densidade de probabilidade F , que adiciona a cada transição com intervalo de disparo não-vazio uma distribuição no tempo (f), que caracteriza a sua probabilidade de disparo ao longo de I .

Assim, o disparo da transição t , no máximo no tempo θ , do estado $S (M, I, F)$, ocorre se:

- a transição t é disparável na RdPT básica;
- a probabilidade de disparo da transição antes ou no tempo 0 não é zero.

O próximo estado $S' = (M', I', F')$ alcançado à partir de S com o disparo de t , é processado com o algoritmo:

- as marcações e os intervalos de tempo são ajustados segundo as regras referentes às TPN.

- a nova função densidade de probabilidade F' é computada para cada transição habilitada por M' , como segue:

. para toda transição t_k habilitada por M e não em conflito com t , então:

$$t'_k(x) = \frac{t_k(x + \theta)}{1 - \rho_k(\theta)} \quad \text{para } EFT'_k < x < LFT'_k$$

= 0, em caso contrário

onde $\rho_k(\theta)$ é probabilidade acumulada de $f_k(x)$ no intervalo $[0, \theta]$

$\theta \rightarrow$ instante de disparo dentro do intervalo estático de t .

. para todas as transições recém habilitadas (ou seja, habilitadas por M' mas não habilitadas por $M-I(t, -)$), a função densidade de probabilidade está amarrada a seus valores iniciais.

7.3 DESCRIÇÃO SUCINTA DO ARP

O Analisador/Simulador de Redes Petri Temporizadas Extendidas (ARP) é uma ferramenta computacional dedicada à análise e simulação de RdPTE, desenvolvida pelo Laboratório de Controle e Microinformática (LCMI) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. O manual do usuário da atual versão é apresentado em [LCMI89]. Um diagrama funcional geral do ARP é apresentado na figura 7.14.

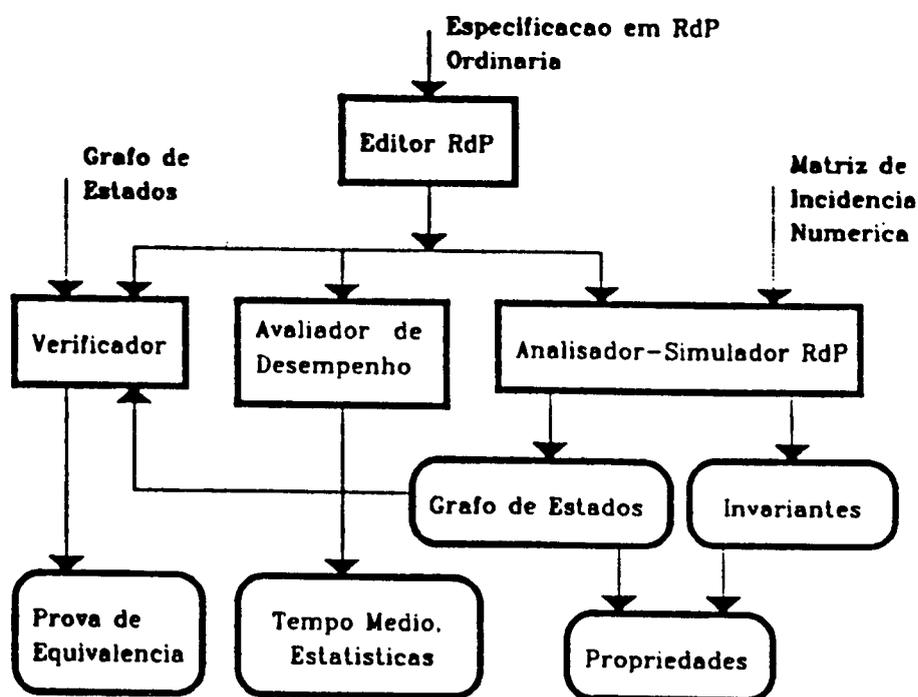


FIGURA 7.14 - Diagrama de blocos de ARP [MAZI89]

a. Funções:

As funções implementadas no ARP são:

- análise direta de máquinas de estados, grafos de eventos, invariantes de lugar, invariantes de transição, enumeração de marcações e projeção;
- análise indireta de enumeração de marcações, máquinas de estados e grafos de eventos;
- simulação não temporizada, através das sub-funções "inibir transições" e "iniciar simulação";
- análise temporizada, com enumeração de classes de estado, simulação e avaliação de desempenho;
- redução da RdP, através das sub-funções redução passo-a-passo, inibição de regras, inibição de transições, inibição lugares e início da redução.

b. Características gerais:

O ARP permite a análise de uma RdPTE com no máximo 150 lugares e 150 transições, com intervalos de disparo estáticos variando entre [0, 32000] e número máximo de fichas igual a 999 para cada lugar. Na análise de desempenho é permitida a definição pelo usuário de até 10 marcações destino e uma marcação origem.

7.4 MODELOS EM RdpTE

7.4.1 PROFIBUS

Adicionalmente ao modelo do serviço SDA (fig. 4.2), os modelos para os demais serviços do PROFIBUS são os seguintes.

7.4.1.1 Serviços RDR/SRD (SDA/RDR/SRD)

- a. Modelo: idem SDA (fig.4.2);
- b. Considerações: o aspecto que diferencia estes serviços do SDA é a temporização relativa aos "frames" de iniciação e resposta (t_{TF} e t_{RF});
- c. Restrições:
 - não representadas as transações de escrita remota e local;
 - não representadas as distintas condições e respostas.

7.4.1.2 Serviço SDN

- a. Modelo: figura 7.15;
- b. Considerações:
 - t_{conf} (interface com o usuário local) indica, localmente, a execução bem sucedida do serviço;

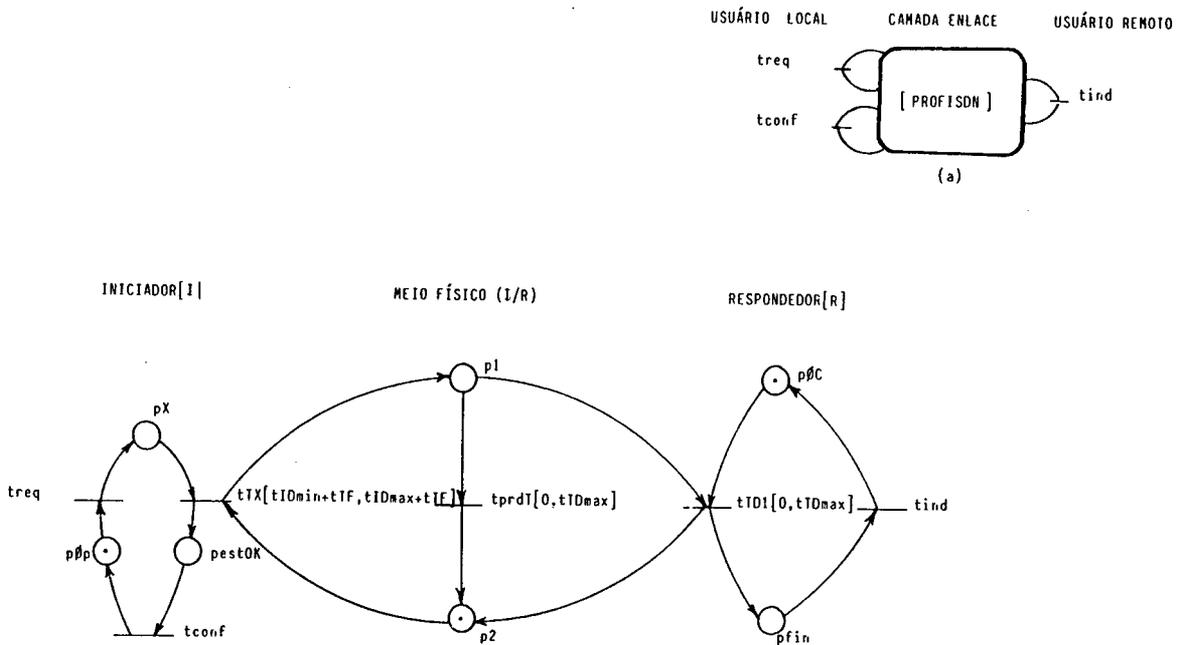


FIGURA 7.15 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do serviço S|N [PROFISDN]

7.4.1.3 Serviços CRDR e CSRD (P)

- a. Modelo: figura 7.16 (fig. 7.16.a para equivalente reduzido)
- b. Considerações:
 - o serviço inicia com tcreq e é concluído na estação local em tOK (com sucesso), terr (com erro de comunicação) e tTO (com "time-out");
 - o desativação do serviço é iniciada com tdreq e concluída com tdconf, após $M(p_{feito}) = n_p$. (treq, tOK, terr, tTO e tdreq são a interface com o usuário local da camada enlace;

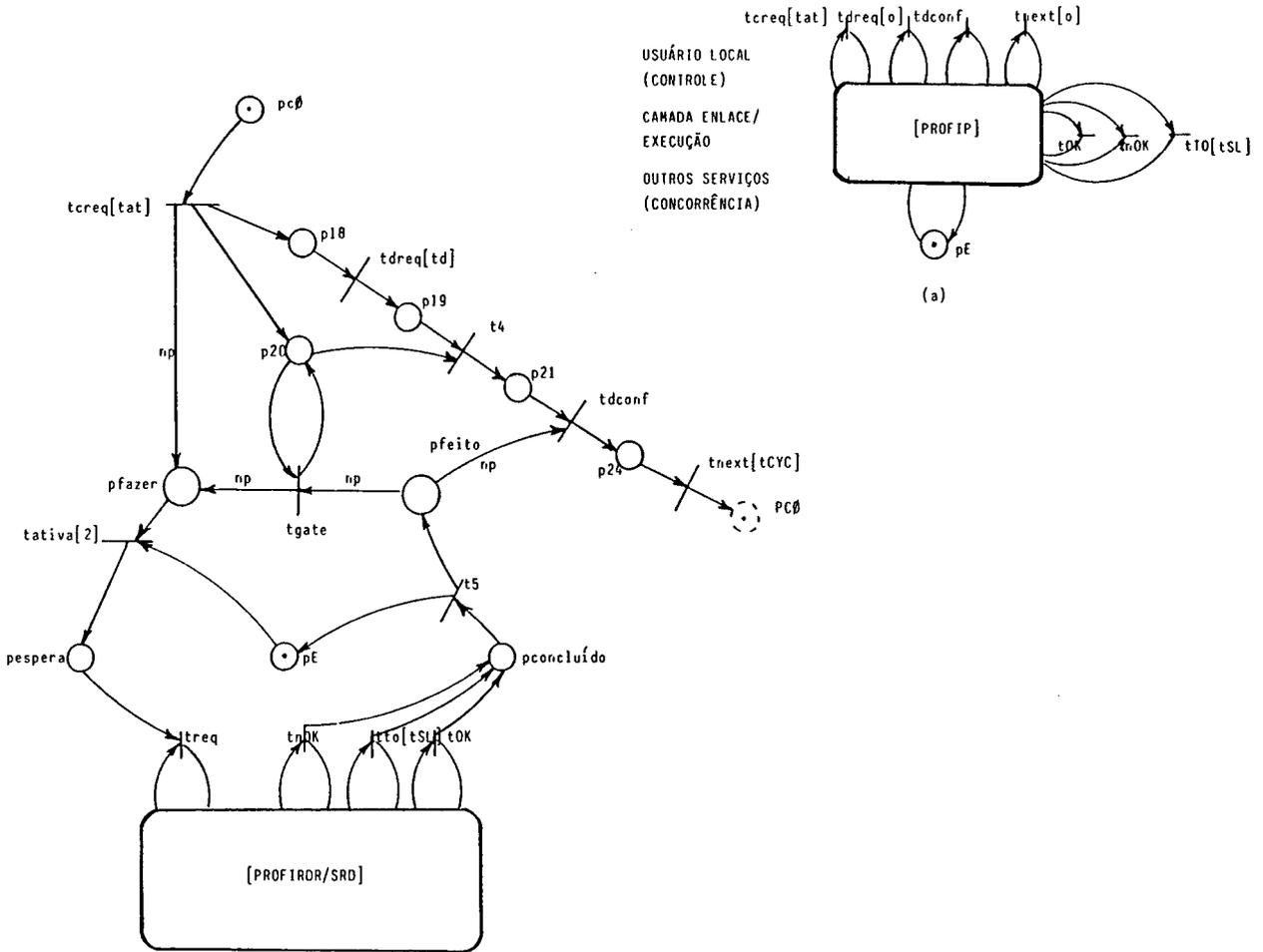


FIGURA 7.16 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE do serviço periódico [PROFIP]

- $tnext$ é o tempo entre duas ativações sucessivas do serviço periódico;
- $pfazer$ acumula as transações pendentes da "Poll_list" e $pfeito$ as transações já executadas;
- pE e $tativa$ são o controle de prioridade relativa entre os serviços.

c. Restrições:

- não descreve t_{AR} , considerado através de pE e tativa, quando concorrendo com outros serviços;
- representa o serviço periódico de uma única estação mestre. Não representa as demais estações, podendo-se assumir que tenham um comportamento similar.

7.4.1.4 Transferência do "token" (TOK)

a. Modelo: figura 7.17 (figura 7.17.a para equivalente reduzido);

b. Considerações:

- a transferência inicia com t_{TT} e é concluída com t_{OK} (com sucesso e/ou uma ou mais retransmissões) ou com t_{nOK} (com "time-out");
- o estado inicial indica: "iminência da transferência do "token".

c. Restrições

- a conclusão da transferência se dá com a recepção pela estação local do primeiro caracter do "frame", independentemente da conclusão da transmissão do "frame" pela NS;
- representa apenas a tentativa de transferência para uma única estação NS.

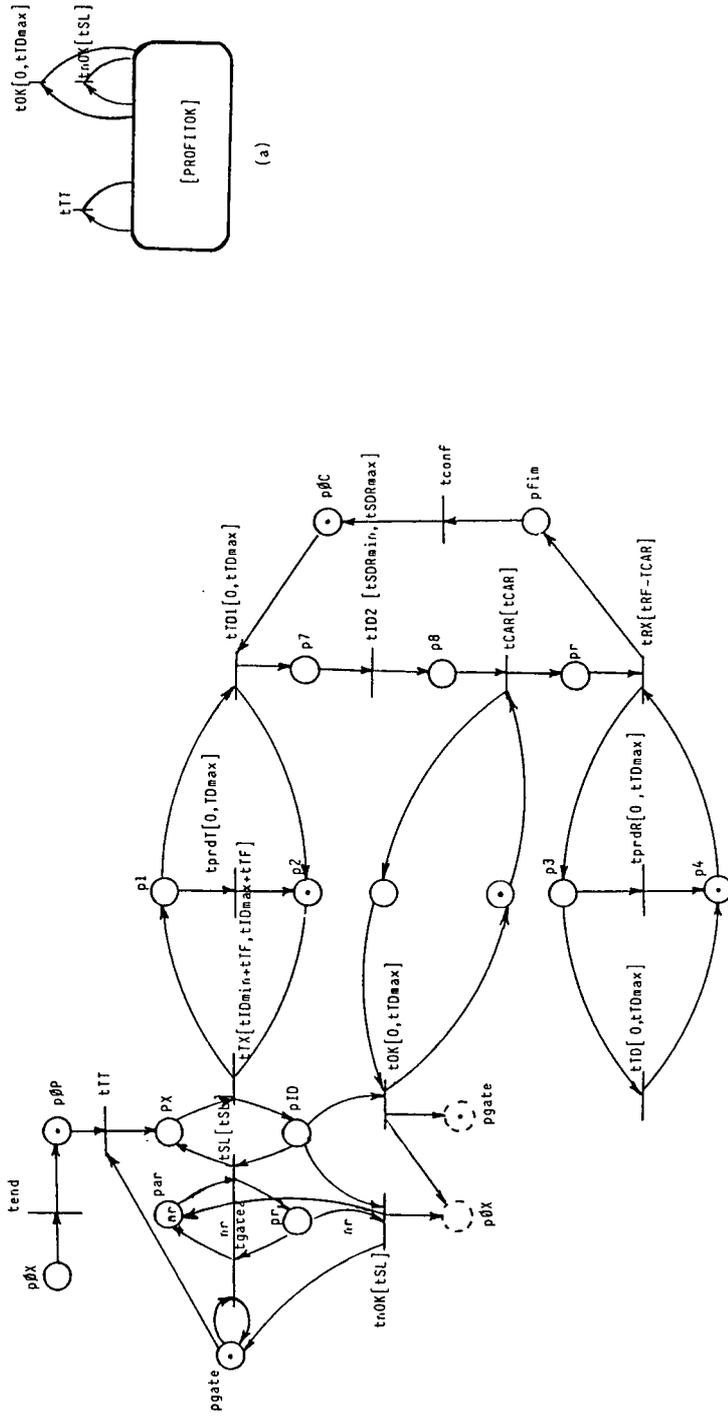


FIGURA 7.17 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE da transferência do "token" [PROFITOK]

7.4.1.5 Rotação e utilização do "token"

- a. Modelo: figuras 7.18 para rotação e 7.19 para utilização (figuras 7.18.a e 7.19.a para equivalentes reduzidos).
- b. Considerações:
- t_{TH2} representa a retenção do "token" em cada estação;
 - t_{TH1} representa a retenção do token na presente estação;
 - p_{n0} e p_{n1} são as estações anteriores e posteriores à recepção "token", respectivamente;
 - o estado inicial do modelo [PROFITTH] consiste em $M(pE) = M(pk) = 1$ e indica: "aquisição do token pela TS".
- c. Restrições: não prevêem a eliminação de uma estação da Live_list, caso a passagem do "token" para a mesma seja mal-sucedida.

À partir de combinações dos modelos anteriores pode-se representar condições de concorrência entre os serviços e mais de uma estação mestre no barramento.

7.4.1.6 Multiplicidade de transações aperiódicas e de mensagem (MUF/M)

- a. Modelo: figura 7.20 (figura 7.20.b para equivalente reduzido);

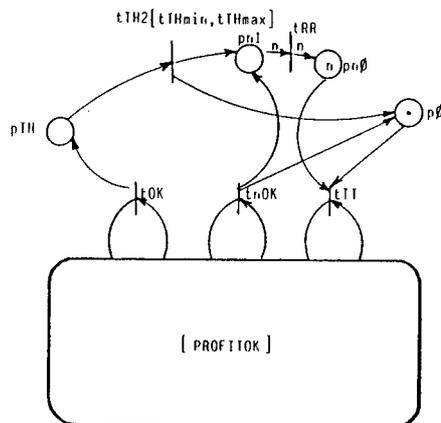


FIGURA 7.18 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE de rotação do "token" [PROFITRR]

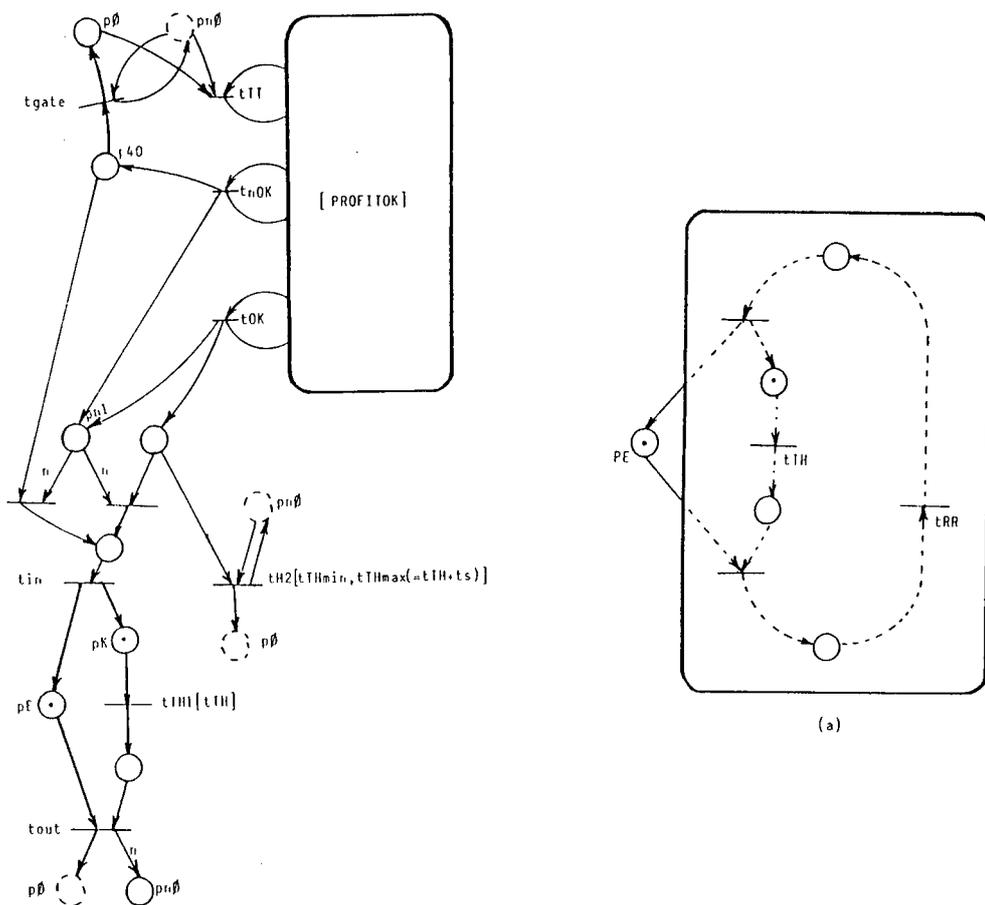


FIGURA 7.19 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE de utilização do "token" [PROFITTH]

Se se gerar um modelo da figura 7.20 para cada uma das condições descritas na tabela da figura 7.20.a (num total de 6 modelos) e combinar-se esses modelos entre si, pela fusão dos seus lugares pE (serviços aperiódicos de alta e baixa prioridades, de mensagem com e sem reconhecimento e de alta e baixa prioridades) o modelo resultante representa genericamente todas as combinações dos serviços aperiódico e de mensagem.

Adicionalmente, se se combinar este resultado com o modelo da figura 7.19 o modelo resultante representa uma configuração mono-controlador completa do PROFIBUS.

7.4.1.7 Serviço periódico combinado (P + TTH)

- a. Modelo: combinação dos modelos das figuras 7.16 e 7.19 pela fusão dos seus lugares pE.
- b. Consideração: representa a perturbação provocada por uma configuração multimestre na execução do serviço periódico.

7.4.1.8 Serviços periódico, aperiódico e de mensagem combinados

- a. Modelo: combinação dos modelos das figuras 7.16, 7.19 e 7.20, através da fusão dos lugares pE, conforme a figura 7.21 (SR + TTH).

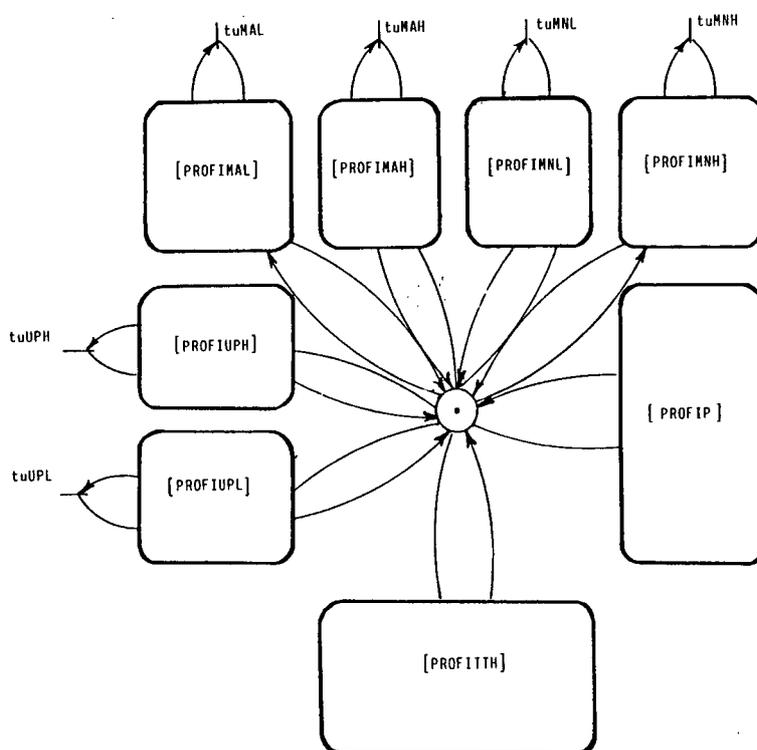


FIGURA 7.21 - PROFIBUS - Modelo em RdPTE mais completo
[PROFISR]

b. Considerações:

- [PROFIUPL] e [PROFIUPH] são os modelos da figura 7.20.b, configurado para representação dos serviços aperiódicos de baixa e alta prioridade, respectivamente;
- [PROFIMA] e [PROFIMN] são os modelos da figura 7.20.b, configurado para representação dos serviços de mensagem com e sem reconhecimento, alta e baixa prioridades, respectivamente;
- o modelo resultante é a representação mais completa que se pode obter da combinação dos modelos anteriores, em uma configuração multimestre.

7.4.2 FIP

7.4.2.1 Serviço de transferência de "Buffer" (TB)

a. Modelo: figura 7.22 (figura 7.22.a para equivalente reduzido).

b. Considerações:

- o serviço inicia com t_{gate} e é concluído em t_{OK} (com sucesso), em t_{nOK} (com erro de comunicação no "frame" de recepção) ou em t_0 (com erro de comunicação no "frame" de transmissão). No produtor e no consumidor, a conclusão do serviço ocorre em t_{SENT} e $t_{RECEIVED}$ (interface com os usuários produtores e consumidores de informação, respectivamente);
- t_{ativar} é o instante em que o produtor acessa o meio físico (instante de início da transmissão do campo, t_{PRE}) e parada do contadores t_0 no árbitro e t_1 no consumidor, descontado o tempo de propagação do sinal no meio físico;
- as combinações de p_1 , p_2 , p_3 e p_4 definem o resultado do serviço no consumidor;
- t_{DPA} , t_{DPC} é o atraso no reconhecimento do início do "frame" resposta no árbitro e consumidor, respectivamente;
- p_{APC}/p_{APC}' , p_{APV}/p_{APV}' , p_{PAC} , p_{PAV} ; p_{ACC}/p_{ACC}' , p_{ACV}/p_{ACV}' e p_{PCC} , p_{PCV} são os segmentos de meio físico entre árbitro e produtor, árbitro e consumidor, produtor e consumidor, respectivamente;

- o estado inicial deste modelo consiste em: $M(pAPV) = M(pAPV') = M(pACV) = M(pACV') = 1$ (meio físico vazio e $M(pOP) = M(pOA) = M(pOC) = 1$ (entidades em "idle state").
- as demais transições são correspondentes às temporizações do serviço, descritas no Capítulo 3.
- o consumidor somente gera a primitiva tRECEIVED quando ambos os "frames", TF e RF, foram recebidos íntegros;
- na ocorrência do "time-out" t_o , o tempo de reação t_{reac} esta considerado em t_o ;

c. Restrições:

- não representa as distintas respostas possíveis do produtor (RP_DAT, RD_DAT_RQi, RP_DAT_MSG), em função das solicitações dos serviços aperiódico e de mensagem;
- não representa os serviços de escrita (L_PUT) e leitura (L_GET) locais e sua interação (partilhamento do "buffer") com o serviço TB;
- supõe que os eventuais erros que possam ocorrer em um determinado segmento do meio físico são independentes dos demais segmentos;

7.4.2.2 Serviço requisição explícita de transferência de "buffer" (IDRQ)

- a. Modelo: figura 7.23 (fig. 7.23.a para equivalente reduzido), da fase de transferência da lista de identificadores do produtor para o árbitro (IDRQ).

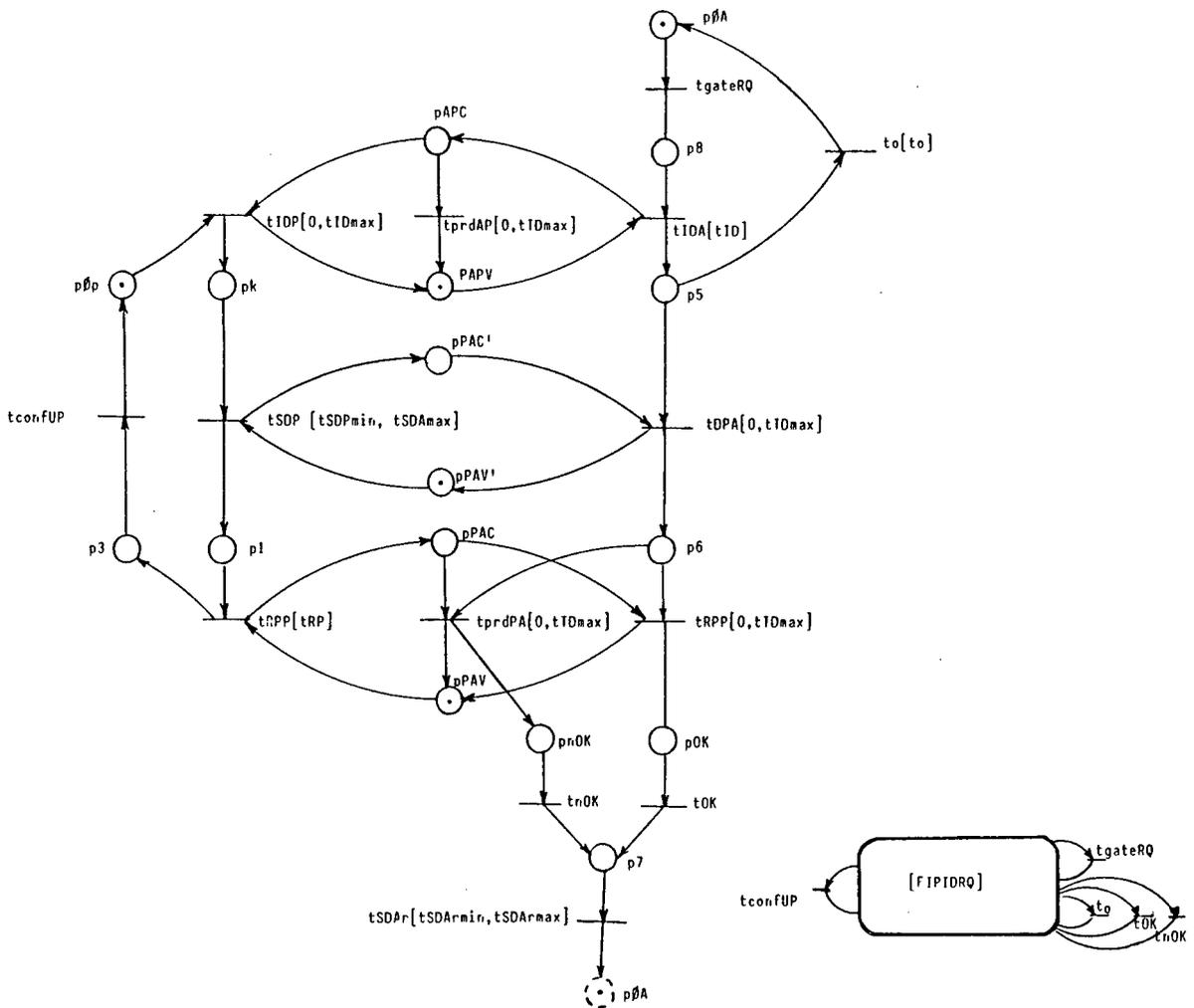


FIGURA 7.23 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço UP
[FIPIDRQ]

b. Considerações:

- tconfUP (interface com o usuário produtor de informação) não assegura a transferência bem sucedida da lista de variáveis;
- tOK e tnOK indicam o resultado da execução da transação IDRQ, para o árbitro;

7.4.2.3 Serviço SDN (MN)

- a. Modelo: figura 7.22 (fig.7.22.a para equivalente reduzido), da fase de transferência de mensagem da janela de mensagem (MN).

7.4.2.4 Serviço SDA (MA)

- a. Modelo: figura 7.24 (fig. 7.24.a para equivalente reduzido), da fase de transferência de mensagem (MA).

b. Considerações:

- o serviço inicia com tgateA e é concluído com terro (expiração do número máximo de retransmissões) ou tSDAr (execução bem sucedida);
- a conclusão bem sucedida do serviço no produtor e no consumidor é indicada nas transições tconfMA e tindMA, respectivamente;
- a reinicialização de par/pr pode se dar diretamente através do disparo de terro ou através de sucessivos disparos de top, na conclusão bem sucedida do serviço.

- c. Restrições: a transação final (tFIN) não está definida nas especificações formais do FIP, tendo sido adotada à partir dos resultados do Capítulo 3, baseada em [FIP89].

Dos modelos anteriores somente TB representa completamente o serviço. Os modelos completos para os serviços aperiódico e de mensagem são resultantes de combinações dos modelos anteriores. Os modelos combinados seguirão descreverão

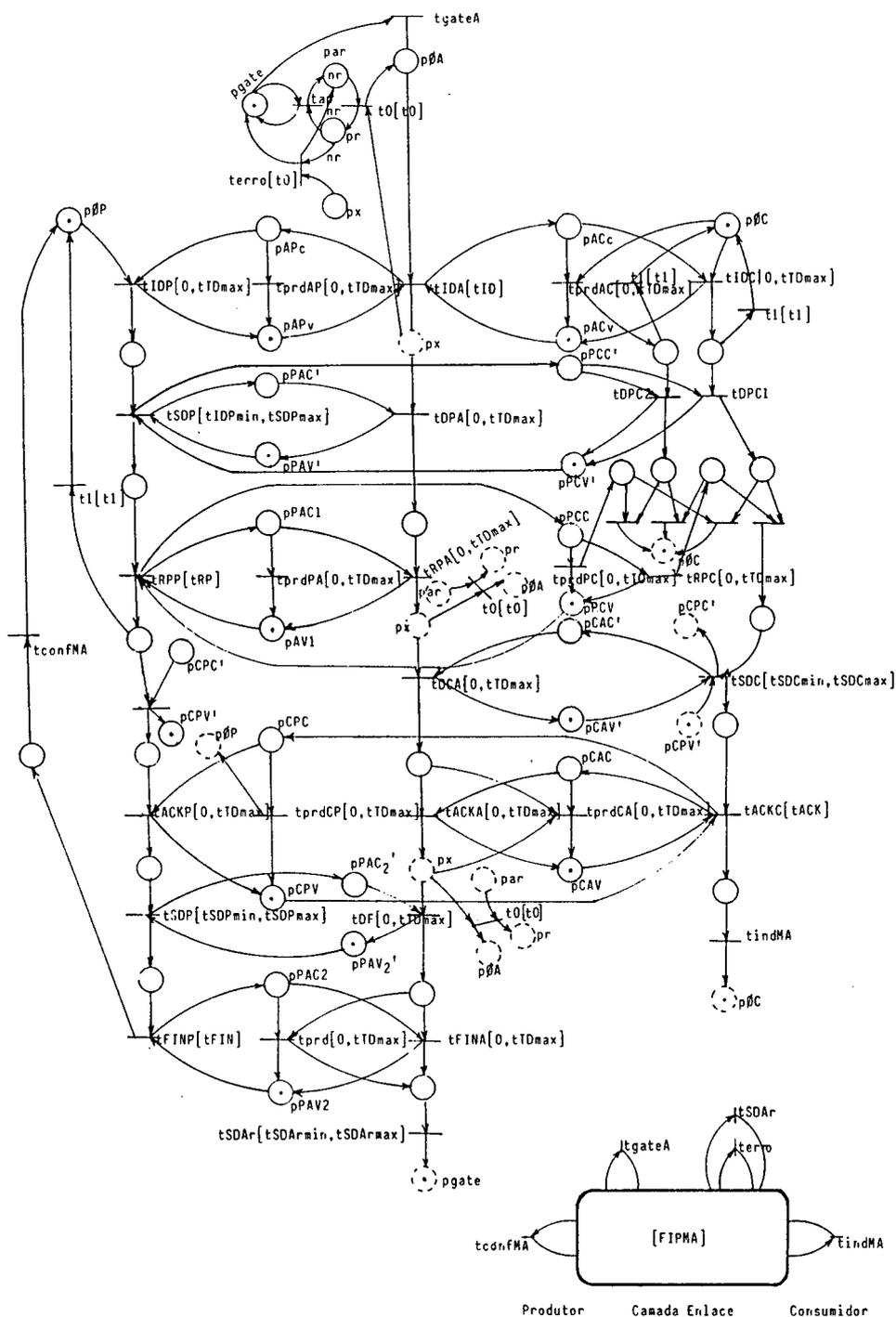


FIGURA 7.24 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço SDA [FIPMA]

as janelas periódica, aperiódica e de mensagem, bem como combinações das mesmas.

7.4.2.5 Serviço periódico (P)

a. Modelo: figura 7.25 (fig.7.25.a para equivalente reduzido).

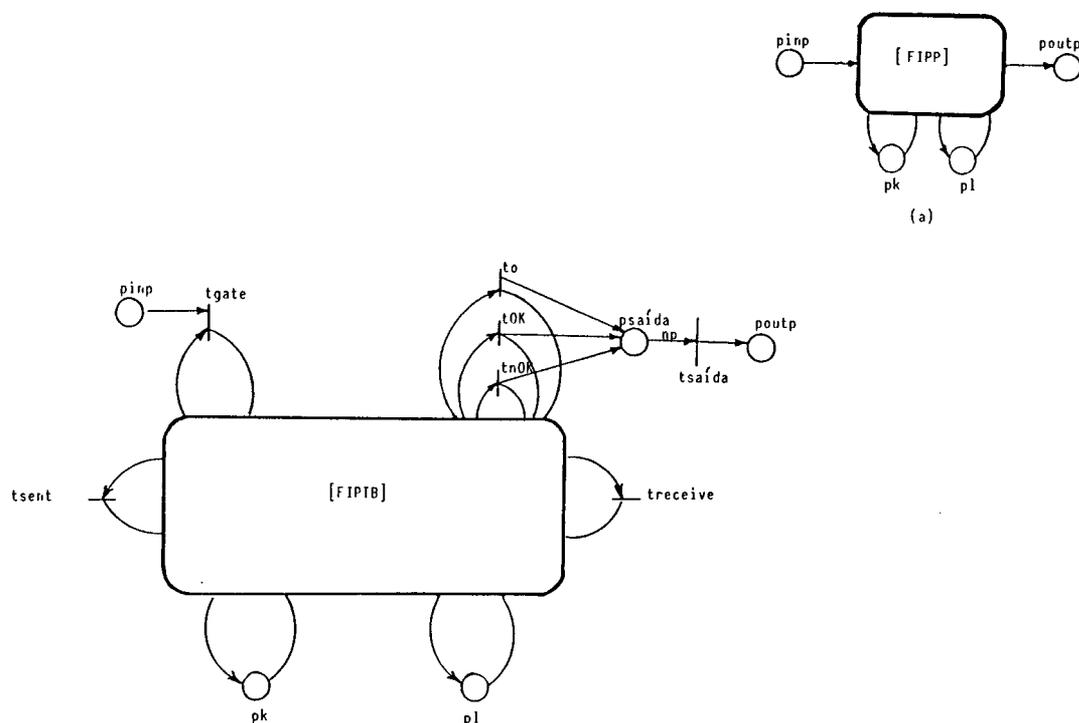


FIGURA 7.25 - FIP - Modelo em RdPTE do serviço periódico
[FIPP]

b. Considerações: pinp e poutp são os lugares de entrada e saída da janela periódica.

c. Restrições: não representa os ciclos de retransmissão de variáveis, presentes na janela periódica.

7.4.2.6 Serviço de mensagem (SDA/SDN) - M)

a. Modelo: figura 7.26 (fig.7.26.a para equivalente reduzido).

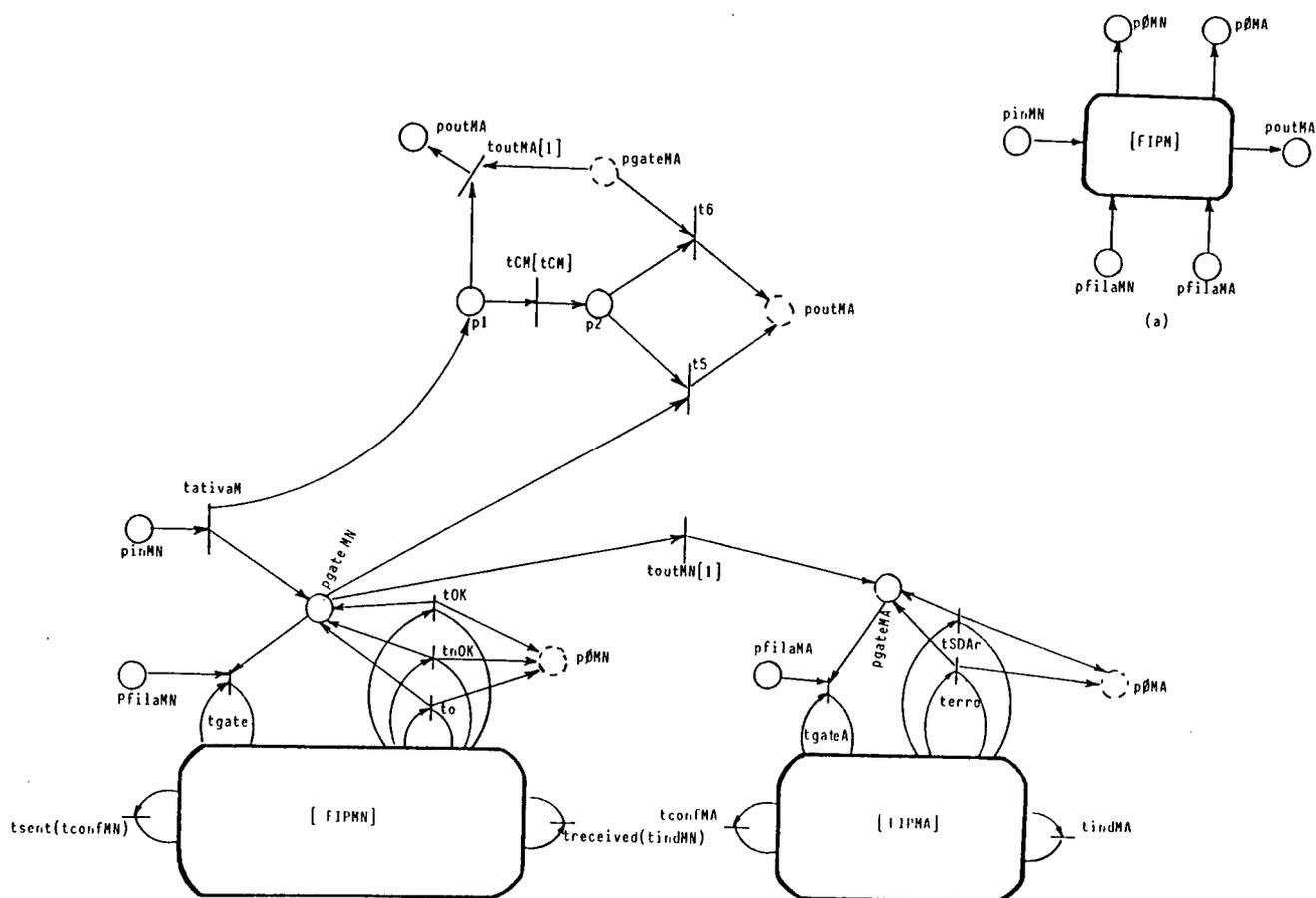


FIGURA 7.26 - FIP - Modelo em RdPTE da janela de mensagem [FIPM]

b. Considerações:

- pinMN, pfilaMN, pfilaMA e poutMA, pOMA são os lugares de entrada e saída da janela de mensagem;

- pfilaMA/pfilaMN e POMN/POMA são as filas de mensagem (SDN e SDA, respectivamente) no produtor e no árbitro, respectivamente.
- pgateMN e pgateMA são os lugares de ativação das transações de mensagem;
- toutMN é a transição de interface entre os serviços SDN e SDA, ativado quando pfilaMN = 0;
- t_{em} é o tempo máximo alocado para o início da desativação da janela de mensagem.

c. Restrições:

- todas as requisições para transações do serviço SDN tem precedência sobre o SDA (estabelecimento de prioridade);
- o tempo de execução da janela é limitado pelo menor entre o número máximo de transações solicitadas e o tempo t_{em} mais o tempo da transação em execução.

7.4.2.7 Serviço aperiódico (UP)

a. Modelo: figura 7.27 (fig. 7.27.a para equivalente reduzido).

b. Considerações:

- pinUPH/pfilaUPL/pfilaUPH e poutUPL/pOUPL/pOUPL/ pOUPH são os lugares de entrada e saída da janela, respectivamente;
- pfilaUPH/pfilaUPL e pOUPH/pOUPL são as filas de espera no produtor e no árbitro, respectivamente;

- no caso de insucesso de uma transação RETB ela será repetida posteriormente (pfilaUP);
- pgateUPH e pgateUPL são os lugares de ativação das transações aperiódicas;
- toutUPH é a transição de interface entre os serviços de alta e baixa prioridades, ativada quanto pfila UPH=0;
- tca é o tempo máximo alocado para o início da desativação da janela aperiódica (macro-ciclo sincronizado).

c. Restrições:

- o tempo de execução da janela periódica é limitado pelo menor entre o número máximo de transações solicitadas e o tempo, tca mais o tempo da transação UP (e transferências tTB associadas), em execução;
- a temporização tca não interrompe a execução de uma lista nIDA em curso.

7.4.2.8 Ciclo Elementar (SR)

a. Modelo: figura 7.28.

b. Considerações:

- tu's são os "request" dos usuários da camada enlace;
- pk e pl são lugares de interface para representação das solicitações do usuário no serviço TB (fig. 7.22);
- nMN, nMA, nUPH e nUPL são as dimensões máximas das filas de mensagem e aperiódica;
- tSYN representa o ciclo de sincronização para espera do final do ciclo elementar.

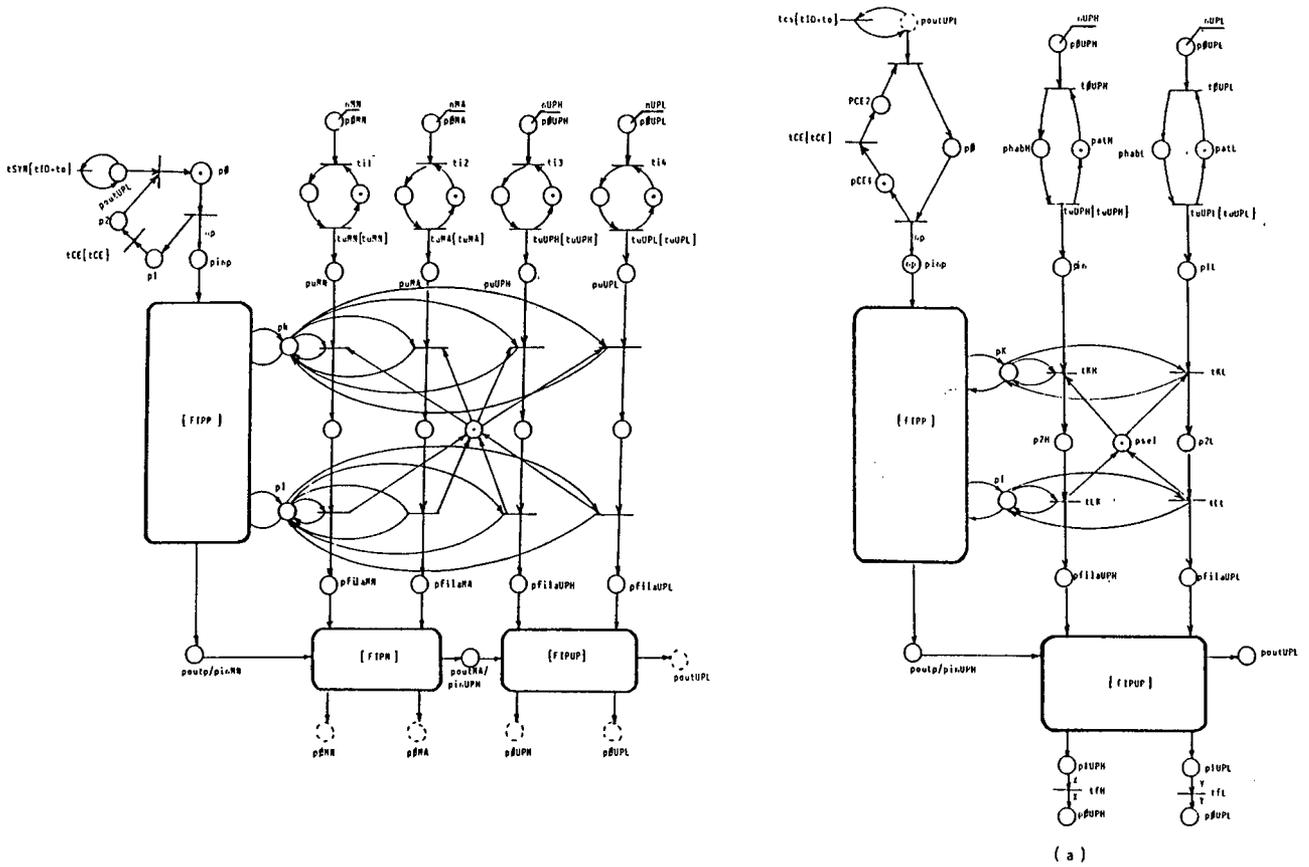


FIGURA 7.28 - FIP - Modelo em RdPTE do ciclo elementar completo [FIPCE]

c. Restrições:

- fazendo-se $t_{ce} = 0$ tem-se a representação do ciclo elementar de um macro-ciclo sem sincronização;
- a utilização de pk e pl , para representação das diferentes respostas em uma transação TB, é uma forma simplificada de se evitar uma representação de grande dimensão, sendo possível somente devido às transições

de saída de p_k e p_l serem temporizadas com o limite inferior do intervalo diferente de zero. Esta representação não considera a perda da transferência de uma solicitação ao árbitro no serviço TB;

- o modelo apresentado é o mais completo que se pode obter com a combinação dos modelos anteriores, podendo ser simplificado, segundo combinações específicas, tal como apresentada na figura 7.28.a, para um ciclo com somente as janelas periódica e aperiódica.