DEPARTAMENTO DE

ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

A Rede Ethernet como elemento integrador dos sistemas de fabrico

FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex – PORTUGAL

A Rede Ethernet como elemento integrador dos sistemas de fabrico

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

A Rede Ethernet como elemento integrador dos sistemas de fabrico

Sérgio Manuel Escarduça Loureiro

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos de grau de mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de especialização de Informática Industrial)

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 1996

Sérgio Manuel Escarduça Loureiro
(sel@tormentas.fe.up.pt)

UNIVERSIDADE DO PORTO
Faculdade de Engenharia
BIBLIOTECA
N.º 51819
CDU 681.3(043)
Data 2 / 3 / 2001

Aos meus Pais

Resumo

A integração entre os diversos níveis dos sistemas de fabrico não é facilmente atingível. Este facto resulta da existência de equipamentos muito distintos e dos requisitos de comunicação impostos pelos diversos níveis serem muito diferentes.

A rede *ethernet* surge como uma alternativa válida, visto estar disponível nos mais diversos equipamentos com custos muito reduzidos. No entanto, esta opção tem alguns problemas associados, nomeadamente em termos de tempo de resposta ilimitado.

Nos sistemas tempo-real não críticos é necessário garantir a estabilidade do sistema e procurar minimizar a possibilidade de ocorrência de mensagens atrasadas. Foram realizados testes experimentais que pretenderam clarificar a utilização da rede *ethernet* neste tipo de sistemas. Os resultados obtidos revelaram que esta solução pode ser uma opção correcta nestes casos.

No entanto, a característica de aleatoriedade do tempo de resposta da rede *ethernet* não permite a sua utilização em sistemas de tempo-real críticos. Identificado o principal obstáculo à utilização da rede *ethernet* como elemento integrador, há que tentar ultrapassá-lo. Com a alteração do seu mecanismo de acesso pode conseguir-se delimitar o tempo de resposta e assim estender o recurso à rede *ethernet* aos sistema de tempo-real críticos. Foram analisadas várias propostas neste sentido e discutidos aspectos de implementação.

Foi realizada uma plataforma de testes perfeitamente genérica que permite continuar a investigação acerca da possibilidade de alterar o mecanismo de acesso da rede *ethernet*, de modo a suportar os mais diversos requisitos.

Finalmente, foi descrito um caso concreto, em que foram abordados os vários aspectos de projecto de uma infra-estrutura de comunicações, e no qual se concluiu que a rede *ethernet* é uma opção correcta.

Palavras-chave: redes de comunicação, *ethernet*, comunicação tempo-real.

Índice

Resumo i

Agradecimentos xi

Lista de Acrónimos xii

Capítulo 1 1

Introdução 1

1.1Estrutura da tese 4

Capítulo 2 5

Arquitectura de rede 5

2.1 Introdução 5

2.2 Arquitectura de rede 7

2.2.1 Redes de Campo 7

2.2.2 Redes intercelulares 8

2.2.3 Redes administrativas 8

2.3 Requisitos de comunicação 9

2.4 Projecto da rede 10

2.4.1 Critérios de escolha 11

2.5 Modelo OSI 12

2.6 Rede intercelular 13

2.6.1 Funções desempenhadas pelos níveis célula e oficina 13

2.6.2 Evolução das arquitecturas de controlo 14

2.6.3 Caracterização do tráfego 15

2.6.3.1 Dados para controlo 15

2.6.3.2 Dados para serviços 16

2.6.4 Requisitos 16

2.7 A integração nos sistemas de fabrico 17

2.7.1 Alternativas de integração 18

2.7.2 Discussão das propostas 19
2.8 Redes Locais 20
2.8.1 Características 20
2.8.2 Classificação dos métodos de acesso 21
2.8.2.1 Protocolos de acesso aleatório 21
2.8.2.2 Protocolos de acesso controlado 22
2.8.2.2.1 Protocolos com reserva 22
2.8.2.2.2 Protocolos com mecanismo de *token* 22
2.8.2.3 Critérios de escolha 22
2.8.3 Normas IEEE 23
2.8.3.1 *Ethernet* e 802.3 24
2.8.3.1.1 Método de acesso ao meio 24
2.8.3.1.2 Características 25
2.8.3.2 *Token-bus* 25
2.8.3.3 *Token ring* 26
2.8.4 Comparação entre redes locais 26
2.8.5 Subredes 28
2.9 Conclusões 29

Capítulo 3 **31**

Caracterização e alteração da rede *ethernet* 31

3.1 Introdução 31
3.2 Contexto actual 32
3.3 *Ethernet* a 100 Mbps 33
3.4 Desempenho da rede *ethernet* 34
3.4.1 Estudos anteriores 34
3.4.2 Comentários 40
3.4.2.1 Justiça 40
3.4.2.2 Colisões 41
3.5 Efeito de captura 41
3.6 Utilização em sistemas de tempo-real 42
3.7 Propostas de alteração 43
3.7.1 Melhoria de desempenho 44
3.7.2 Integração de prioridades 45
3.7.3 Suporte de comunicação tempo-real 47
3.7.3.1 Métodos de acesso controlado 48
3.7.3.1.1 BRAM 48
3.7.3.1.2 MSAP 48
3.7.3.1.3 Tempra 49
3.7.3.2 Métodos de acesso aleatório 49
3.7.3.2.1 Partição no tempo 50
3.7.3.2.2 Partição por endereços 51
3.7.3.3 Métodos de acesso variável 52
3.7.3.3.1 PCSMA 52
3.7.3.3.2 RETHER 53

3.8 Conclusões 53

Capítulo 4 ..... **55**

Testes experimentais sobre *ethernet* 55

4.1 Introdução 55

4.2 Contexto actual 56

4.3 Abordagem experimental 56

4.4 TCP/IP 57

4.4.1 Aplicações fabris 59

4.4.2 Caracterização 59

4.4.3 Camada IP 60

4.4.4 Protocolos TCP e UDP 61

4.4.5 Desempenho do TCP/IP 62

4.5 Condições de teste 65

4.5.1 Sistema operativo 65

4.5.2 Método de teste 66

4.5.2.1 Opção flood 67

4.5.3 Rede 68

4.5.4 Estatísticas 68

4.5.5 Monitorização da rede 69

4.5.6 Dimensão dos pacotes 70

4.6 Testes - 1ª parte 70

4.6.1 Testes sem carga 71

4.6.1.1 Apresentação de resultados 72

4.6.1.2 Tempos de serviço máximos 72

4.6.1.4 Influência do tamanho dos pacotes 73

4.6.1.4.1 Tempo da transmissão 74

4.6.1.4.2 *Device loopback* 74

4.6.1.4.3 Tempos máximos 75

4.6.1.5 Conclusões 76

4.6.2 Testes de capacidade máxima 78

4.6.3 Carga no receptor 79

4.6.4 Carga no emissor 80

4.6.5 Conclusões 81

4.7 Testes - 2ª parte 82

4.7.1 Três emissores, um receptor 83

4.7.1.1 Tráfego à taxa máxima 83

4.7.1.2 Tráfego eventual 85

4.7.2. Dois emissores, dois receptores 87

4.7.2.1 Tráfego à taxa máxima 87

4.7.2.2 Tráfego eventual 87

4.7.3 Testes sem eco 88

4.7.4 Conclusões 89

4.8 Limitações dos testes 90
4.9 Conclusões finais 91

Capítulo 5 **95**
Adaptação da rede *ethernet* ao tempo-real 95

5.1 Introdução 95
5.2 Caracterização da plataforma de desenvolvimento 97
5.2.1 Sistema operativo 97
5.2.2 Controladores de rede 97
5.2.3 Conclusões 99
5.3 Análise das diferentes propostas 99
5.3.1 Critérios 100
5.3.2 Métodos de acesso variável 100
5.3.3 Métodos de acesso controlado 101
5.3.4 Robustez dos métodos 102
5.3.5 Tempo de acesso 104
5.3.6 Implementação 104
5.3.6.1 Segurança 105
5.4 Controlo em malha fechada 106
5.4.1 Avaliação do estado da rede 107
5.4.2 Conclusões 107
5.5 Controlo de acesso 108
5.5.1 Implementação 109
5.6 Conclusões 110

Capítulo 6 **111**
Um caso prático 111

6.1 Introdução 111
6.2 Contexto actual 112
6.3 A empresa 112
6.4 Fluxo produtivo 113
6.4.1 Armazém 113
6.4.2 Corte 114
6.4.3 Montagem 114
6.4.4 Controlo final 115
6.4.5 Embalagem 115
6.4.6 Manutenção 115
6.5 Planeamento e Gestão da produção 116
6.5.1 Planeamento e balanceamento 116

6.5.2 Previsão de rendimentos 117
6.6 Controlo da Produção 118
6.7 Motivação do projecto 118
6.8 Descrição do projecto 119
6.8.1 Planeamento agregado da produção 120
6.8.2 Balanceamento das linhas de montagem 121
6.8.3 Simulação 122
6.8.4 Organização da informação 122
6.8.5 Monitorização e Controlo 123
6.8.5.1 Sistema de Identificação Fabril 124
6.9 Comentários finais ao projecto 124
6.10 Projecto da rede de comunicação 125
6.10.1 Fluxo de informação 127
6.10.2 Rede entre postos de trabalho 128
6.10.3 Rede entre controladores de linha 130
6.10.4 Integração 132
6.11 Conclusões 133

Capítulo 7 **135**
Conclusões 135

Referências **139**

Índice de Figuras

Fig. 2.1 - Modelo do Sistema de Fabrico 6
Fig. 2.2 - Arquitectura de rede 7
Fig. 2.3 - Tabela de Requisitos de Comunicação 10
Fig. 2.4 - Modelo OSI 12
Fig. 2.5 - Alternativas de Integração 19
Fig. 3.1 - Configuração Experimental 36
Fig. 3.2 - Tempra 49
Fig. 4.1 - TCP/IP 58
Fig. 4.2 - Encapsulamento 63
Fig. 4.3 - Configuração dos PCs 65
Fig. 4.4 - Sistema de Comunicação 71
Fig. 4.5 - Influência do tamanho dos pacotes 73
Fig. 4.6 - Componentes do tempo de serviço 75
Fig. 4.7 - Capacidade máxima 79
Fig. 4.8 - Carga no receptor 80
Fig. 4.9 - Carga no emissor 81
Fig. 6.1 - Fluxo Produtivo 113
Fig. 6.2 - *Layout* da secção de montagem 115
Fig: 6.3 - Fluxo de informação 127

Agradecimentos

Durante a realização desta dissertação recebi provas de amizade e solidariedade por parte de muitas pessoas. Assim, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

ao Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho, na qualidade de orientador desta tese pelo total apoio e disponibilidade sempre manifestados durante o desenvolvimento daquela;

à Isabel pela paciência em me aturar e como fonte de inspiração;

à Cristina Maria sempre implacável e impecável;

à minha Irmã por preciosa ajuda e carinho;

aos grandes amigos Jorge (obrigado pela ajuda), e Paulo e Paula;

às crianças Luisinho e Filipinho pela amizade e pela ponta final;

aos companheiros de guerra Luís Pinho e Armando;

aos colegas do ISR, grupo de Automação Industrial, em especial ao Zé Augusto e ao emigrado Alexandre;

à Faculdade de Engenharia do Porto e ao Instituto de Sistemas e Robótica pela cedência de equipamentos e instalações;

à JNICT e ao Programa Praxis XXI pela bolsa de estudo;

A todos os meus amigos, que não foram esquecidos, e à minha Família;

Muito especialmente aos meus Pais e à minha Irmã

Lista de Acrónimos

ARP	Address Resolution Protocol
BEB	Binary Exponencial Backoff
BSD	Berkeley Software Distribution
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAN	Controller Area Network
CNC	Computer Numerical Control
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
DCE	Distributed Computing Environment
EPICS	Experimental Physics and Industrial Control System
FIFO	First In First Out
FIP	Factory Instrumentation Protocol
FTP	File Transfer Protocol
GOSIP	Government OSI Profile
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internet Protocol
ISA	Instrumentation Society of America
ISO	International Organization for Standarddistion

LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAP	Manufacturing Automation Protocol
MMS	Manufacturing Message Specification
NIST	National Institute of Standards and Technology
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	Programmable Logical Controller
PROFIBUS	PROcess FieldBUS
RFC	Request For Comments
TCP	Transmition Control Protocol

Capítulo 1

Introdução

A transferência eficiente de informação entre todos os elementos que constituem um sistema fabril é cada vez mais essencial para assegurar a competitividade industrial.

O sistema fabril engloba um conjunto variado de equipamentos que suportam aplicações com objectivos e características muito distintas. Este é normalmente estruturado hierarquicamente em níveis que permitem decompor a sua complexidade.

Cada nível tem objectivos e horizontes temporais diferentes. Deste modo, as aplicações de um dado nível apresentam requisitos muito diferentes, relativamente aos outros níveis. Estes requisitos impostos pelas aplicações englobam também requisitos de comunicação. As necessidades de comunicação se restringem apenas a um dado nível, mas têm que ser asseguradas entre os equipamentos e aplicações de todos os níveis do sistema de fabrico.

As redes de comunicação surgem como elemento fundamental na transferência eficiente de informação nos sistemas de fabrico. No entanto, os requisitos de comunicação assumem diferenças significativas entre os vários níveis. Este facto, aliado à diversidade dos equipamentos, dificulta o estabelecimento de canais de comunicação entre a totalidade desses equipamentos.

A integração do sistema de fabrico só é atingida com a criação de canais de comunicação. Por outro lado, os desenvolvimentos nas redes de comunicação têm condicionado o próprio conceito de integração.

O estabelecimento de uma infra-estrutura de comunicação entre os vários níveis presentes num sistema de fabrico não é facilmente realizável pelas razões já descritas. Uma possibilidade consiste na utilização do MAP (*Manufacturing Automation Protocol*). No entanto, trata-se de

uma solução cara, e muito complexa para aplicações simples. Como vantagens, são de referir os factos de ser um *standard* e uma proposta completa.

A utilização de redes que foram objecto de normalização surge como alternativa vantajosa em muitas aplicações. Neste contexto, a rede *ethernet* revela-se uma opção válida, devido à disponibilidade na grande maioria dos equipamentos e ao custo reduzido.

Contudo, esta solução tem algumas desvantagens associadas. O facto de não possuir um tempo de resposta limitado condiciona a sua utilização nos sistemas que impõem este requisito. Este requisito encontra-se normalmente associado aos níveis inferiores dos sistema de fabrico.

A aleatoriedade introduzida pelo mecanismo de acesso da rede *ethernet* traduz-se em complexidade de análise e comparação com as outras alternativas, em termos de redes locais. Este facto é responsável por alguns mitos estabelecidos acerca do seu desempenho.

É de referir um aspecto muito importante, e que serviu de motivação a este estudo, que é a disponibilidade da taxa de transferência a 100 Mbps. Este facto implica um ajustar significativo de escala, pelo que níveis de utilização que eram considerados elevados passaram a ser caracterizados como ligeiros. Nestes regimes, a grande vantagem da rede *ethernet* é o seu tempo de resposta muito curto face aos outros concorrentes: o *token-bus* e o *token-ring*.

Um dos objectivos deste trabalho é efectuar a caracterização da rede *ehernet*. O esclarecimento dos problemas associados ao mecanismo de acesso ao meio e a avaliação das suas consequências surgem na sequência do estudo efectuado.

Depois de identificado o principal obstáculo à sua utilização como elemento integrador dos sistemas de fabrico, é importante efectuar a sua análise. Esta análise pretende clarificar os factores que influenciam o desempenho da rede *ethernet* e verificar se é possível minimizar estes factores.

Nos sistemas de fabrico em que o requisito de tempo-real para a comunicação não existe, interessa sobretudo tentar maximizar o desempenho e estudar a estabilidade. A estabilidade, vista como a possibilidade da rede saturar, é por vezes posta em causa no que diz respeito à rede *ethernet*. É extremamente importante o esclarecimento deste aspecto na justificação da opção por esta rede.

Quando o tempo-real surge como requisito fundamental, é necessário distinguir dois casos: os sistemas críticos (*hard real-time systems*) e os não críticos (*soft* ou *best-effort*) [Veríssimo, 94].

No segundo caso, é importante garantir a estabilidade do sistema de comunicação e minimizar a probabilidade de atrasos na comunicação. A utilização da rede *ethernet* tem que ser equacionada numa perspectiva de qualidade de serviço exigida pela aplicação. A inexistência de regras bem definidas, neste campo, torna complexa esta tarefa. No entanto, pretende-se que este estudo ajude a clarificar esta situação.

Nos sistemas críticos não é possível a utilização da rede *ethernet*. Deste modo, este estudo avalia a possibilidade de efectuar alterações no mecanismo de acesso com o objectivo de atingir o tempo-real.

Este assunto já foi alvo de vários estudos que resultaram na apresentação de propostas de alteração da rede *ethernet*, que permitem o estabelecimento de comunicação tempo-real.

No sentido de perceber melhor os factores que influenciam o comportamento da rede *ethernet* foram realizados alguns testes experimentais. Os objectivos dos testes residiam na contextualização dos problemas associados a esta rede para uma plataforma cada vez mais presente nos sistema de fabrico: o PC; e na percepção da ordem de grandeza dos factores envolvidos.

Os estudos realizados até aqui recorreram sempre a plataformas de maior poder de cálculo e custo, pelo que era importante verificar se os problemas descritos também se verificavam para plataformas mais limitadas.

Concretamente, era importante verificar se o suporte de comunicação de uma aplicação concreta, que está descrita no capítulo seis, poderia ser assegurado por esta rede.

Em termos mais gerais, importava verificar se a rede a 10 Mbps constitui o estrangulamento das aplicações distribuídas, devido ao crescimento acelerado do desempenho das plataformas de *hardware*.

Os testes realizados não pretenderam ser intensivos, de modo a justificar de forma probabilística a utilização da rede *ethernet*, quando sujeita a um certo número de condições.

Estes testes, tal como grande parte do estudo, centraram-se na discussão dos sistemas sem exigências temporais, ou com exigências não críticas. Assim, faltava abordar os sistemas críticos.

A análise das propostas de alteração da rede *ethernet* que visam atingir o tempo-real foi efectuada com o objectivo de constituir um conjunto vasto de soluções baseadas em *ethernet*, que permitissem a sua utilização nos mais variados sistemas.

Neste sentido, foi realizado o desenvolvimento de uma plataforma que possibilita o teste e comparação destas propostas. Os aspectos de implementação para a plataforma utilizada para o desenvolvimento também foram focados. Esta plataforma genérica e independente do *hardware* pretende também servir de suporte a futuros desenvolvimentos.

1.1Estrutura da tese

O presente trabalho é constituído por sete capítulos, dos quais o primeiro é esta introdução que descreve a motivação e define em traços gerais os aspectos que vão ser abordados nos capítulos seguintes.

No segundo capítulo são abordados os requisitos impostos à comunicação pelos diferentes níveis existentes num sistema de fabrico. São analisadas as várias opções de integração, nomeadamente as redes locais objecto de normalização, que são comparadas entre si.

No capítulo três é caracterizada a rede *ethernet* que, pela sua disponibilidade na maioria dos equipamentos, desempenha um papel fundamental na integração dos sistemas de fabrico. São analisados os problemas associados à sua utilização em sistemas de tempo-real. Várias propostas de alteração da rede *ethernet* são apresentadas de modo a possibilitar a utilização desta rede mesmo em aplicações de tempo-real críticas.

No quarto capítulo é descrito um conjunto de testes que pretendeu caracterizar a rede *ethernet* como elemento de um sistema de comunicação e verificar a possibilidade da sua utilização em sistemas de tempo-real não críticos.

Dada a impossibilidade da utilização da rede *ethernet* em sistemas tempo-real críticos, no capítulo cinco analisaram-se as propostas apresentadas no capítulo três de alteração desta rede de modo a permitir a sua utilização neste tipo de sistemas. Foram discutidos aspectos de implementação na plataforma de desenvolvimento usada. A descrição do desenvolvimento de uma plataforma que permita continuar a investigação deste assunto finalizou este capítulo.

No capítulo seis é referido um caso prático onde a rede *ethernet* desempenha o papel de elemento integrador dado que não possui exigências de tempo-real.

O sétimo e último capítulo aborda as conclusões sobre o trabalho realizado e discute algumas perspectivas de desenvolvimento do mesmo.

Capítulo 2

Arquitectura de rede

2.1 Introdução

Um sistema fabril possui requisitos diferentes nas suas partes constituintes, pelo que a interligação subjacente ao conceito CIM não é realizável integralmente, na grande maioria dos casos, recorrendo ao mesmo tipo de rede.

Assim, identificando vários níveis num sistema fabril pode verificar-se quase imediatamente a complexidade na definição de uma rede global e homogénea. A ISO propõe uma estrutura hierárquica para descrever os sistemas de fabrico em seis níveis (fig. 2.1):

- Empresa: Este nível é responsável pela definição dos objectivos da empresa, num horizonte temporal de longo prazo.

- Fábrica: Realiza a gestão de informação ao nível da fábrica, concepção de planos de engenharia, planeamento agregado da produção e escalonamento da produção.

- Oficina: Tem como função a atribuição de recursos às diferentes tarefas e coordena a sua execução.

- Célula: Este nível efectua a coordenação das tarefas dentro da célula, escalonando-as pelas diversas estações de trabalho. Realiza ainda as funções de despacho e monitorização das tarefas.

- ▷ Estação: Coordena a execução de tarefas e monitoriza o estado das diversas estações de trabalho. As estações podem ser *robots*, máquinas-ferramenta, manipuladores, controladores, entre outros.

- ▷ Equipamento: Este nível é responsável pela execução da tarefa propriamente dita, lidando directamente com as matérias-primas e com os produtos acabados ou semi-trabalhados. Consiste, por exemplo, na execução de programas de controlo numérico.

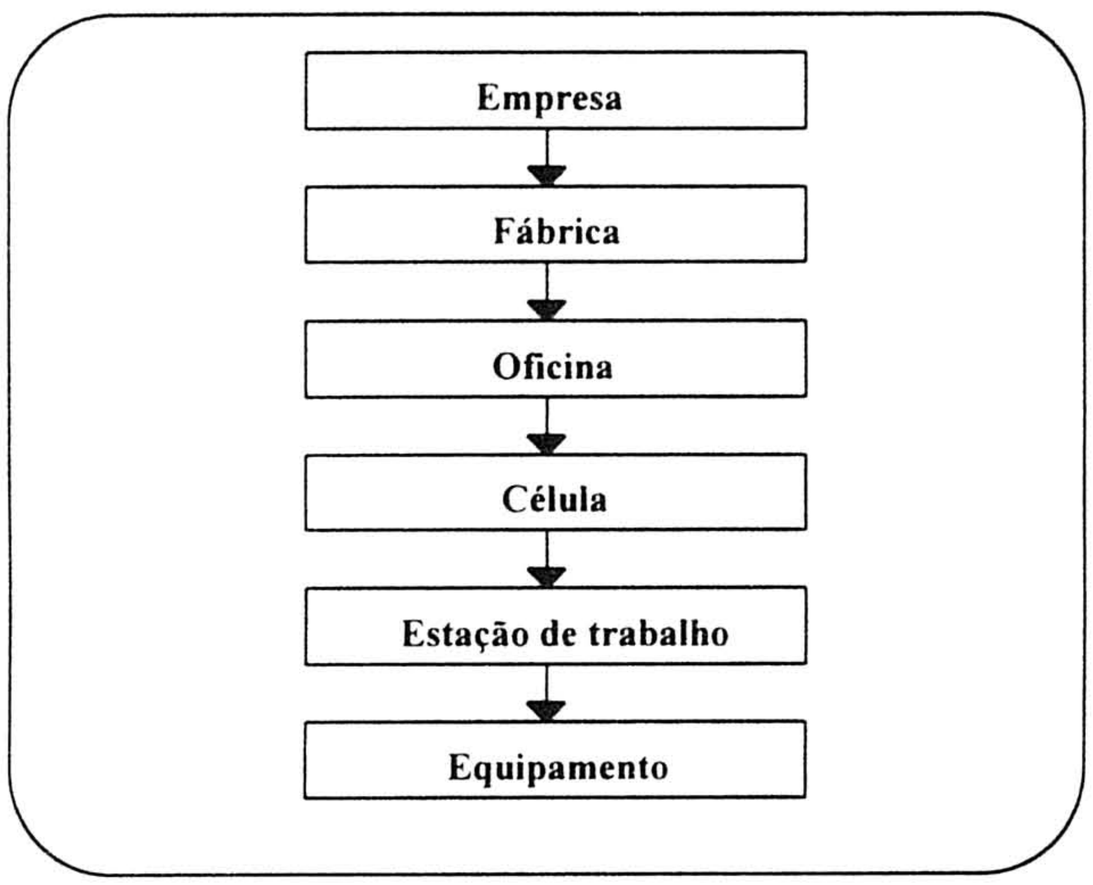


Fig. 2.1 - Modelo do Sistema de Fabrico

Os diferentes níveis prestam serviços ao nível imediatamente superior, realizando-se assim uma decomposição dos objectivos finais da empresa, nos programas executados nos diversos dispositivos. É de salientar, a diminuição do grau de importância das tarefas, ou seja, do seu valor acrescentado, à medida que se desce na hierarquia. Por outro lado, o horizonte temporal que está subjacente vai sendo reduzido, no mesmo sentido, podendo atingir exigências tempo-real nos níveis inferiores.

Esta classificação hierárquica é muito semelhante a outras propostas, como por exemplo os modelos AMRF (*Advanced Manufacturing Research Facility*) proposto pelo NBS (*National Bureau of Standards*) com cinco camadas e o modelo AFMS (*Advanced Factory Management System*) desenvolvido pela *Computer Aided Manufacturing Inc.*. A opção pela referência ao modelo ISO justifica-se pelo facto de ser uma norma e pretender abranger todas as outras propostas.

2.2 Arquitectura de rede

Cada um dos níveis do sistema de fabrico apresenta características e, por conseguinte, requisitos de comunicação diferentes. Correspondendo a este modelo hierárquico encontram-se arquitecturas de rede adaptadas, que podem ser subdivididas em três grandes grupos isolados e distintos: redes de campo, redes intercelulares e redes administrativas (fig.2.2).

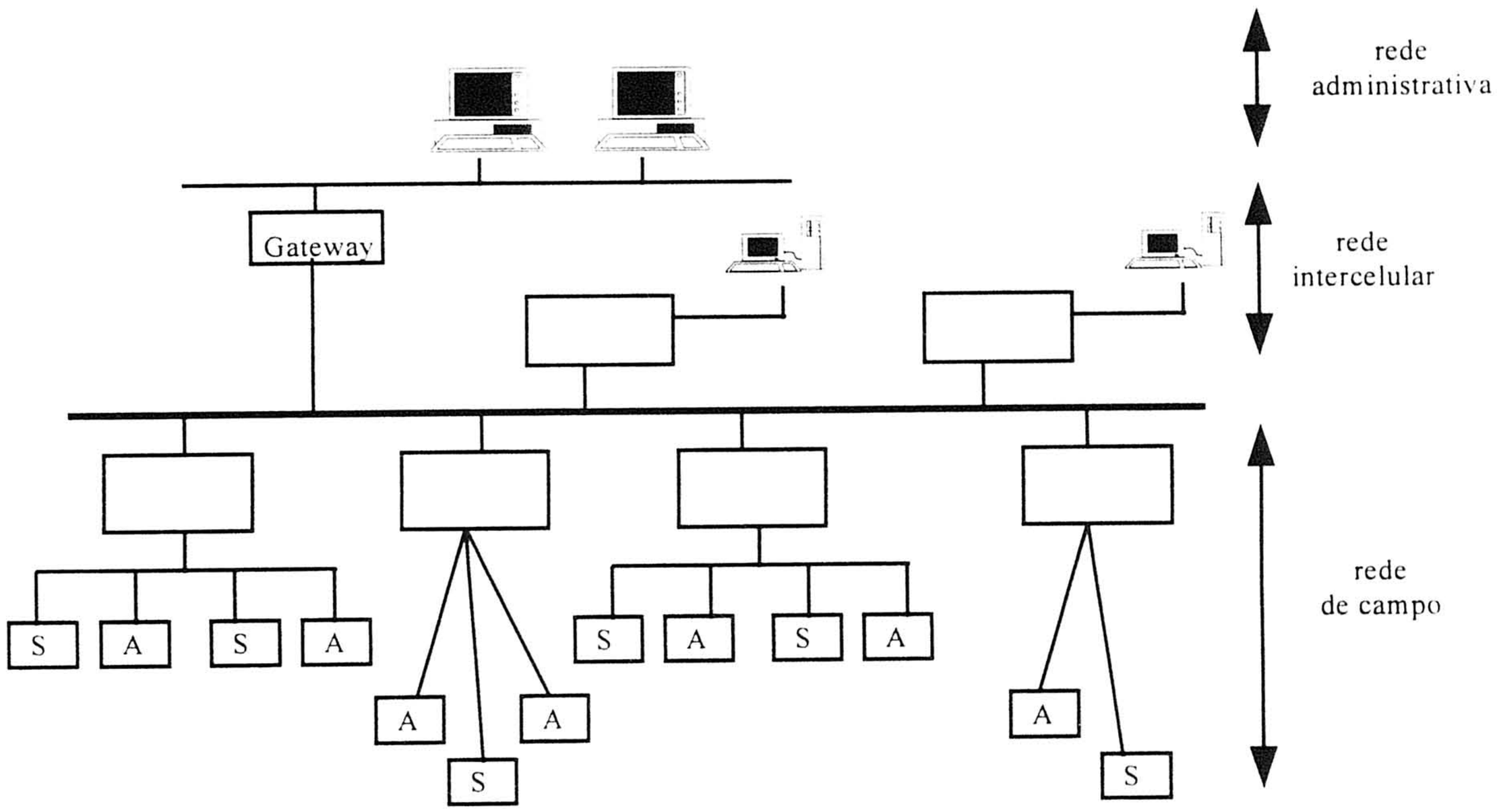


Fig. 2.2 - Arquitectura de rede

2.2.1 Redes de Campo

Estas redes constituem o nível mais baixo e interligam os vários sensores (S), actuadores (A) e controladores, por exemplo, autómatos programáveis, que interagem directamente com o processo produtivo.

A este nível assumem preponderância os requisitos de tempo-real e fiabilidade. O número de propostas para esta área é elevado e podem coexistir várias soluções com campos de actuação distintos e não necessariamente interligadas. Trata-se de soluções normalmente particulares, com

um grau reduzido de abertura. A criticalidade das funções desempenhadas implica cuidados especiais em termos de tolerância a falhas e fiabilidade.

Exemplos deste tipo de rede são: FIP, PROFIBUS, BITBUS, AS-I e CAN. As características do seu tráfego dependem em grande parte da aplicação, correspondendo, regra geral, tráfego de cariz mais periódico a indústrias de processo, e tráfego aperiódico ou aleatório aos sistemas de manufactura.

Dada a grande diferença entre as propostas existentes, pode ainda subdividir-se esta classe noutras duas. Uma classe com mais funcionalidades, geralmente associada com as redes intracelulares (FIP e PROFIBUS), e outra para ligação de dispositivos mais simples (sensores e actuadores) e com custo mais reduzido (AS-I e CAN).

2.2.2 Redes intercelulares

A caracterização e definição desta rede afiguram-se como as mais complexas dada a diversidade que pode assumir e particularidades a que está sujeita. Assim, a sua principal função é integrar os vários componentes presentes nos níveis do sistema fabril de oficina e/ou célula já referidos, e as redes de campo que lidam directamente com o processo produtivo.

Uma situação típica é a interligação dos vários controladores de célula quando a planta fabril assim está organizada. São o suporte que permite a coordenação desses controladores entre si e entre estes e o nível superior.

Podem possuir exigências de tempo-real (críticas ou não), dependendo da aplicação. De qualquer forma, o seu desempenho é muito relevante para a resposta do sistema global.

2.2.3 Redes administrativas

O nível mais elevado ocupa-se de tarefas ditas administrativas, interligando geralmente PCs e *workstations*.

Caracteriza-se por protocolos de alto nível com elevado grau de abertura, para comunicação entre aplicações com as mais diversas funcionalidades, como, por exemplo, acesso a um servidor de ficheiros ou de nomes.

Esta rede pode estar ligada a uma rede pública de dados, com os riscos inerentes em termos de segurança. Tratando-se de comunicação entre serviços de alto valor acrescentado, traduz-se por um grande *overhead* no protocolo e grandes quantidades de informação, embora sem requisitos temporais apertados.

Esta rede interliga geralmente as áreas financeira, de engenharia (CAD/CAM/CAE), planeamento da produção e de gestão de matérias-primas.

2.3 Requisitos de comunicação

Os requisitos impostos às diversas arquitecturas de rede são, necessariamente, distintos. A necessidade de utilização de redes de computadores nos sistemas de fabrico avançados não merece contestação, visto constituírem um elemento essencial para a integração proposta no conceito CIM. Por outro lado, a sua evolução tem condicionado o próprio conceito CIM.

Já foi realizado o enquadramento da utilização das redes num sistema de fabrico e referidas as funções que são suportadas nos diversos níveis, pelo que se está em condições de realizar a análise qualitativa dos seus requisitos (fig 2.3). Estes podem ser de vária ordem [MITS, 94]:

- ▷ Capacidade: Qual a taxa de transferência necessária.
- ▷ Suporte de tempo-real: Necessidade de garantir *deadlines* para a comunicação.
- ▷ Quantidade de nós: Relacionada com a complexidade do endereçamento.
- ▷ Escalabilidade/Modificabilidade: Facilidade de expansão e modificação.
- ▷ Criticalidade: Importância do seu funcionamento no desempenho global do sistema de fabrico.
- ▷ Fiabilidade: Quantificada pelo tempo médio entre falhas.
- ▷ Preço: Custo da interface e da própria rede (cabo).
- ▷ Comprimento: Máxima distância que pretende servir.

	Rede de Campo	Rede Intercelular	Rede Administrativa
Capacidade	baixa	média	alta
Suporte de tempo-real	sim	não/sim	não
Quantidade de nós	baixa	média	alta
Escalabilidade/Modificabilidade	baixa	média	média/alta
Criticalidade	alta	média	baixa
Fiabilidade	alta	média	baixa
Preço	baixo	médio	alto

Fig. 2.3 - Tabela de Requisitos de Comunicação

Existem outros requisitos que derivam destes, como, por exemplo, a tolerância a falhas e o tempo máximo de resposta, e outros que são menos importantes em sistemas de fabrico, como a segurança na transmissão dos dados (supondo que o acesso físico aos nós e cabo é restrito).

2.4 Projecto da rede

A análise realizada dos requisitos impostos ao meio de comunicação peca pela imprecisão, que resulta do facto de ser genérica.

As aplicações podem assumir contornos muito distintos, com características específicas, que não são contempladas numa análise deste género. Assim, a definição destes requisitos deve ser quantificada com precisão, sendo o resultado da tradução dos requisitos de comunicação da própria aplicação.

O projecto da arquitectura de rede consiste na definição dos seguintes componentes [Pimentel, 90]:

- ▷ Mecanismo de acesso ao meio: O meio físico é um recurso partilhado pelos nós, pelo que o seu acesso tem de ser regulado.

- ▷ Camadas hierarquicamente superiores: Têm como função a gestão da comunicação.
- ▷ Interface com o utilizador: Serviços disponibilizados ao utilizador.
- ▷ Transmissão em banda estreita/larga: Coexistência de vários canais de comunicação no mesmo meio físico.
- ▷ Meio físico: O cabo propriamente dito, que deve ter em atenção eventuais actualizações.
- ▷ Suporte de tempo-real: A solução final necessita ou não de garantir tempos máximos para a transmissão.
- ▷ Grau de gestão requerido: Relacionado com o tipo de controlo de acesso (distribuído/centralizado) e funcionalidades para gestão do meio.

Existem várias interdependências entre estes componentes, pelo que na sua definição impera uma perspectiva global.

Sob outro ponto de vista, verifica-se que o projecto consiste na definição das diferentes camadas que compõe o modelo OSI.

2.4.1 Critérios de escolha

A primeira decisão prende-se com a utilização de propostas já existentes, ou com o desenvolvimento de uma solução particular. Dentro das propostas existentes, é preciso distinguir as soluções proprietárias das traduzidas em *standards*.

Outros pontos orientadores na definição destes componentes são o custo, a complexidade, o ambiente de funcionamento e a fiabilidade exigida.

A solução final resulta da assunção de vários compromissos, polarizados pela relevância atribuída a cada um dos critérios referidos.

2.5 Modelo OSI

Este modelo hierárquico (fig 2.3) pretende dividir as funções necessárias ao estabelecimento de comunicação em sistemas abertos. As sete camadas podem ser divididas em duas grandes infra-estruturas:

- ▷ Camadas inferiores: Disponibilizam serviços *end-to-end* de transferência de dados.
- ▷ Camadas superiores: Disponibilizam serviços de aplicação responsáveis pela transferência de informação.



Fig. 2.4 - Modelo OSI

Detalhando mais esta análise, encontra-se a descrição sucinta das funções associadas a cada camada:

7 Aplicação: Efectua a interface com o utilizador. As aplicações desenvolvidas assentam nesta classe.

6 Apresentação: Responsável pela tradução da representação de dados transmitida.

5 Sessão: Realiza a gestão e controlo de fluxo.

4 Transporte: Assegura fiabilidade e a multiplexagem da comunicação.

3 Rede: Regula a transferência de dados pela rede, ou seja, o seu encaminhamento.

2 Ligação de Dados: Responsável pela transmissão, construção dos pacotes e controlo de erros de um dado canal.

1 Física: Regula a interface mecânica e eléctrica.

Cada uma das camadas presta serviços à camada hierarquicamente superior.

2.6 Rede intercelular

Este estudo centra-se na avaliação das alternativas existentes ao nível da denominada rede intercelular. Esta denominação não implica, contudo, que o sistema fabril tem que possuir uma organização celular. No sentido de aprofundar e esclarecer este conceito, é importante efectuar uma análise mais detalhada e contextualizar a sua missão no sistema.

Esta rede pretende interligar os agentes envolvidos na supervisão e coordenação dos níveis inferiores, como, por exemplo, controladores de célula, sistemas de transporte, armazéns automáticos e outros controladores. Um exemplo típico é a interligação dos controladores de célula, quando a planta fabril tem uma estrutura celular.

Esta rede serve normalmente os níveis de célula e oficina já descritos.

2.6.1 Funções desempenhadas pelos níveis célula e oficina

Genericamente, estes níveis têm associadas as funções de controlo intercelulares e da oficina. A existência destes dois níveis de controlo não é obrigatória, concretamente em aplicações menos complexas.

As tarefas de controlo requeridas são semelhantes, diferindo nos objectos controlados. Enquanto o controlo de área é exercido sobre controladores de célula, caso a planta fabril assim esteja ordenada, o controlo de célula actua sobre os equipamentos (CNCs, por exemplo) e estações de trabalho. De qualquer forma, esta estruturação pretende abranger sistemas fabris muito diferentes, e organizados de maneiras muito distintas.

No entanto, é importante tentar identificar as funções desempenhadas nestes níveis, mesmo que muito genericamente [Bauer, 91]:

- ▷ Monitorização: Avaliação do estado de funcionamento dos objectos controlados.
- ▷ Controlo (despacho): Realização de directivas que controlam a execução das tarefas no nível inferior. Por exemplo, arranque ou paragem de uma célula ou de um equipamento.
- ▷ Escalonamento: Dados os comandos e objectivos pelo nível superior, efectuar a atribuição de recursos de modo a optimizar as variáveis pretendidas (custo e/ou tempo, por exemplo).

Estas tarefas podem assumir um cariz mais centralizado ou distribuído consoante o grau de dependência relativamente a um dado elemento que desempenha o papel de controlador. Por outro lado, a autonomia face ao nível superior também pode variar, dependendo dos graus de liberdade atribuídos a um dado nível.

2.6.2 Evolução das arquitecturas de controlo

A necessidade crescente de fiabilidade, tolerância a falhas, escalabilidade, adaptabilidade e facilidade de reconfiguração provocaram uma evolução no sentido do controlo distribuído ou heterárquico [Ditts]. Estes requisitos advêm das necessidades de diversificação e diferenciação impostas pelos mercados actuais.

No entanto, há que destacar o factor económico, sempre determinante, que aponta nesta direcção, visto a relação preço/performance ser favorável à constituição de sistemas com vários pontos de processamento (minicomputadores e microcomputadores) face à tradicional aproximação *mainframe*. Esta solução centralizada constitui um único ponto de falha, podendo também constituir o estrangulamento de todo o sistema com o crescimento da complexidade do sistema de controlo.

Podem ainda referir-se a distribuição física inerente de algumas aplicações, a flexibilidade e a partilha de recursos como atractivos dos sistemas de controlo distribuídos.

Resumidamente, as desvantagens de uma abordagem distribuída face ao controlo centralizado residem na heterogeneidade dos componentes que constituem o sistema de controlo, e na gestão global mais complexa. Surgem assim, os problemas da inexactidão do estado global, da

incongruência da informação, e da ordem parcial de eventos [Veríssimo, 94], também denominada causalidade, que têm sido objecto de diversos estudos.

De qualquer forma, apesar dos vários progressos nesta área, as propostas que permitem facilitar ou resolver estes problemas de forma integrada, concretamente o DCE, não é suportado em todas as plataformas e introduz uma carga computacional assinalável e não comportável para os sistemas mais modestos.

Por outro lado, a rede constitui mais um ponto de falha do sistema, seja física (ruptura do cabo ou avaria do controlador de rede) ou motivada pela incorrecta utilização por parte dos diversos pontos de acesso (protocolo de comunicação alterado), ou ainda pela saturação deste meio.

Uma desvantagem menos significativa nos sistemas fabris comparativamente com as redes públicas e metropolitanas, mas que não pode deixar de ser referida, é a segurança no acesso aos dados. Não só durante a fase de transmissão, mas também devido à inerente disponibilidade de acesso a partir de um maior número de pontos, é acrescida a necessidade de mecanismos de protecção da informação nos sistemas distribuídos.

A evolução no sentido da distribuição do controlo tem colocado novas exigências a nível da comunicação, traduzindo-se em maiores volumes de informação que é preciso transmitir entre os diversos agentes decisores. As propostas para resolução dos problemas inerentes aos sistemas distribuídos traduzem-se, geralmente, num incremento do esforço computacional e da quantidade de dados. De qualquer forma, a evolução do *hardware* tem conseguido suplantar eficazmente este obstáculo, influenciando de forma determinante o próprio conceito CIME no sentido da distribuição.

2.6.3 Caracterização do tráfego

Dadas as funções a que está associada, a rede intercelular transmite diversos tipos de dados, dos quais se podem destacar dois grandes grupos: dados para controlo e dados para serviços.

2.6.3.1 Dados para controlo

Efectuam a coordenação entre os diferentes elementos decisores dos níveis hierarquicamente inferiores, podendo ter um cariz periódico (medidas) ou eventual (alarmes ou *download* de programas), correspondendo normalmente ao tipo de indústria envolvida (processo ou

manufactura, respectivamente) mas que exige uma transmissão "rápida". Devem assim assumir um tratamento prioritário. Os dados a transmitir são de tamanho reduzido, caracterizando-se por pacotes pequenos. Estão normalmente associados ao tráfego em tempo-real das redes de campo.

2.6.3.2 Dados para serviços

Estes encontram-se mais directamente relacionados com tarefas administrativas, como, por exemplo, a constituição de registos históricos. A sua transmissão não assume prioridade elevada, pelo que não deve competir com os dados para controlo no acesso ao meio; no entanto, deve realizar-se de forma eficiente. Os dados a transmitir são geralmente numerosos, mas os seus pacotes podem ter comprimentos muito distintos dependendo do serviço a que estão associados; por exemplo, podem desempenhar uma simples função de *acknowledge* ou fazer parte de uma grande transferência de registos.

A percentagem ocupada por cada um destes tipos de tráfego e as suas características específicas dependem, em grande parte, da aplicação. Estes dados advêm da tradução dos requisitos da aplicação e condicionam evidentemente a solução final.

É de salientar, a maior importância assumida pelo tempo de resposta para os primeiros dados, contrastando com a maior relevância do *throughput* para os segundos.

2.6.4 Requisitos

Para este trabalho são mais relevantes os requisitos de comunicação, podendo afirmar-se superficialmente que estes se tendem a aproximar dos níveis adjacentes. Por outras palavras, à medida que caminhamos no sentido dos níveis hierarquicamente superiores do sistema de fabrico, a importância do tempo de resposta vai-se esbatendo e assume maior relevância o *throughput*.

Apesar de já ter sido efectuada a análise dos requisitos a que esta arquitectura de rede visa responder, esta foi de algum modo superficial, e pretendeu essencialmente realçar as diferenças para com as outras arquitecturas presentes, no caso geral, num sistema fabril e contextualizar o seu emprego.

Os requisitos a seguir mencionados pretendem pormenorizar melhor os requisitos já apontados, e vincar uma faceta mais virada para a implementação [Pimentel, 90]:

- ▷ Capacidade de transmissão de mensagens com tamanhos muito diferentes: Resulta da coexistência dos dois tipos de dados referidos
- ▷ Gestão de recursos partilhados: A existência de recursos cujo acesso é concorrente implica regulação.
- ▷ Controlo de erros apertado: Os erros de comunicação devem ser detectados e corrigidos através de *acknowledgements*.
- ▷ Não possuir um único ponto de falha: A importância do funcionamento desta rede para o desempenho do sistema global exige fiabilidade elevada.
- ▷ Comprimentos totais que podem atingir alguns km: Pode servir toda a planta fabril e/ou vários edifícios.
- ▷ Comunicação tempo-real: De modo a aumentar a produtividade do sistema fabril é importante que haja um limite máximo para a transmissão de uma mensagem. A rede de comunicação não deve ser o estrangulamento do sistema.
- ▷ Mecanismo de prioridades nas mensagens: Existem dados cuja urgência não se coaduna com os mecanismo de transmissão normal.
- ▷ Transferência de mensagens fiável: Necessário evitar mensagens perdidas ou alteradas.
- ▷ Meio partilhado: A rede pode ser a infra-estrutura de suporte a outras funções que não as associadas à rede intercelular.

O comprimento serve como factor indicativo que enquadra esta rede na classe das redes locais. É importante verificar se esta classe de redes engloba propostas que satisfaçam os restantes requisitos.

2.7 A integração nos sistemas de fabrico

A presença de redes de computadores tornou-se um imperativo dos sistemas de fabrico avançados, não sendo obrigatório que a estrutura de controlo seja distribuída.

Particularmente nos sistemas fabris, a coordenação entre os vários nós levanta um dos principais problemas que é a necessidade de estabelecer protocolos que suportem a comunicação. Os diversos equipamentos provêm normalmente de diferentes fabricantes, com protocolos proprietários e apesar dos esforços em criar *standards*, nomeadamente o MAP, nem sempre é fácil proceder à sua interligação. Por outro lado, devido ao facto destes *standards* não serem amplamente utilizados, as soluções tornam-se caras, e a sua justificação nem sempre é fácil.

2.7.1 Alternativas de integração

As principais alternativas que existem para a resolução deste problema encontram-se mencionadas em [Mitchell, 91], cuja referência é o modelo OSI (fig 2.4):

- A Recurso a um integrador de sistemas. Cada fabricante de equipamento não se preocupa com as necessidades de comunicação. Cabe ao integrador de sistemas apreender o funcionamento do equipamento e desenvolver uma interface de comunicação. Trata-se obviamente de uma solução complexa e necessariamente cara. Se a informação disponibilizada pelo fabricante não for suficiente pode ser impraticável.

- B Só são definidas as duas camadas mais baixas (física e de ligação de dados). As funcionalidades das restantes camadas são da responsabilidade de quem desenvolve o sistema, cuja tarefa ainda se afigura complexa, por ser necessário atender às particularidades de cada equipamento. Como exemplos mais utilizados têm-se os protocolos RS-232 e *ethernet*.

- C Encontram-se estabelecidas as quatro camadas mais baixas. O exemplo mais ilustrativo é o protocolo TCP/IP sobre *ethernet*, cujo emprego generalizado noutras aplicações tem servido de motor à sua utilização na integração de equipamentos fabris. O esforço exigido para estabelecer uma plataforma de comunicação é consideravelmente reduzido.

- D São definidas as duas camadas superiores. Esta abordagem, significativamente diferente, estabelece uma interface funcional. É responsabilidade dos fabricantes e integradores suportarem a interface definida, mas esta é a única limitação ao desenvolvimento.

- E Utilização de *standards*. Recai nesta categoria o protocolo MAP, em que cada uma das diversas camadas se encontra plenamente descrita e documentada. As dificuldades residem na correcta definição e implementação do *standard* por parte de todos os intervenientes do processo. Por outro lado, trata-se sempre de um processo demorado.

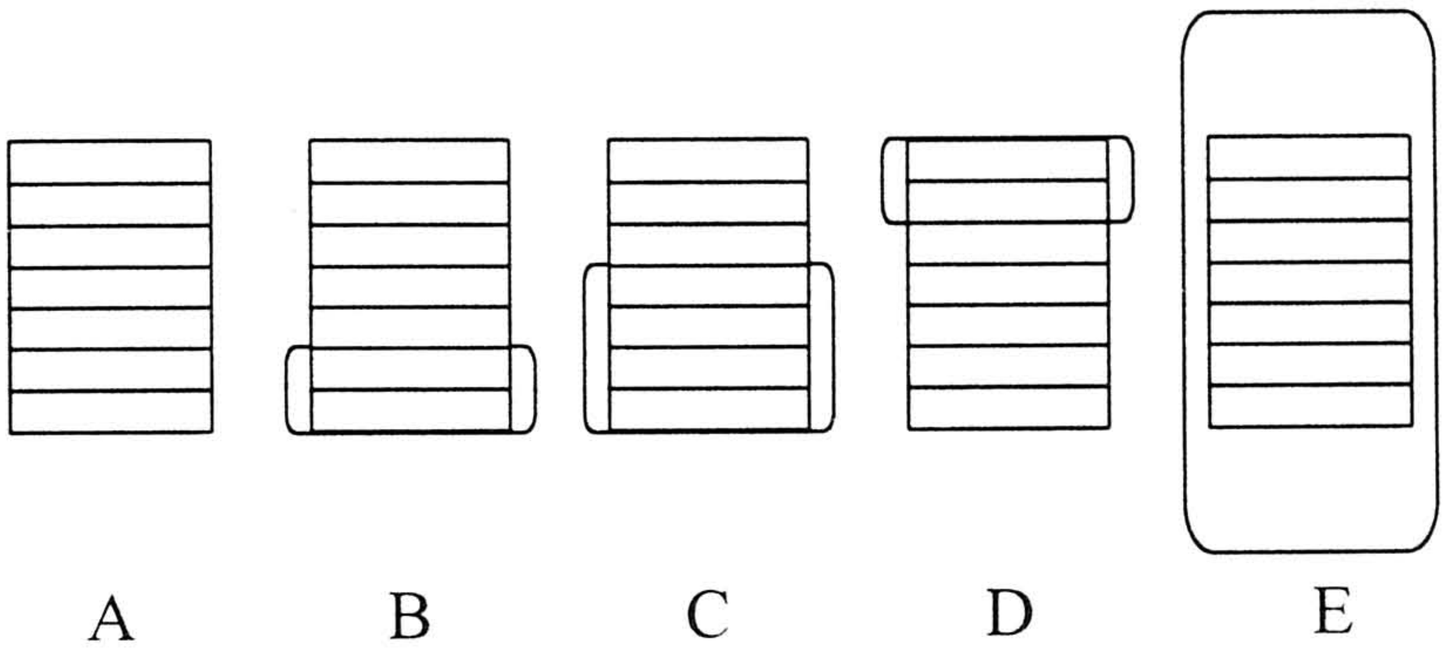


Fig. 2.5 - Alternativas de Integração

2.7.2 Discussão das propostas

A abordagem E levanta problemas para protocolos complexos, cujo esforço de normalização é elevado, pelo que não permite acompanhar os desenvolvimentos em indústrias cuja constante de tempo de evolução é reduzida. Adicionalmente, é preciso que todos os fabricantes dos equipamentos usados respeitem as regras estabelecidas e suportem as suas evoluções.

A solução RS-232 omnipresente nos equipamentos, permite um acesso simples e muito útil, mas reduz a comunicação a ligações ponto a ponto, o que é extremamente limitativo. Além disso, não é um *standard*.

A rede *ethernet* constitui uma solução generalizada a quase todas as plataformas, com um custo reduzido, e com uma capacidade de transmissão assinalável, tendo como principal desvantagem a falta de determinismo. Em conjunto com o TCP/IP está largamente implantada em aplicações denominadas de escritório.

A abordagem D é completamente distinta das restantes, exigindo uma grande cooperação entre os integradores do sistema e os fabricantes de equipamentos. A solução resultante é necessariamente especializada, contrapondo-se às restantes soluções que pretendem ser

generalizáveis. O seu foco são as particularidades da aplicação de modo a definir as funcionalidades que são necessárias. Segundo [Mitchell, 91] revela-se como sendo a alternativa cujo custo global é mais reduzido, mas depende das circunstâncias, concretamente do número de equipamentos.

A segunda alternativa mais acessível é a proposta C, pois o esforço de desenvolvimento é inferior às soluções A e B, e, relativamente à solução E, não incorre nos custos de criação e desenvolvimento associados ao *standard*.

Devido ao facto deste estudo incidir sobre a arquitectura de rede nos sistemas de controlo e monitorização da produção, não se pode encerrar esta discussão sem referir também os outros *standards* propostos pelo IEEE para redes locais, ou seja, o *token-bus* e o *token-ring*. Estas soluções estão englobadas na alternativa B já mencionada e são perfeitamente válidas, apesar de acrescentarem alguma complexidade face aos exemplos mencionados (RS-232 e *ethernet*).

2.8 Redes Locais

A rede intercelular enquadra-se nas denominadas redes locais, conceito que pode ser definido como [Stallings, 84]: uma rede local é uma rede de comunicação que realiza a interligação de variados dispositivos transmissores de dados numa área restrita.

Esta definição um pouco vaga é similar à proposta pelo IEEE, que utiliza o termo "área geográfica de tamanho moderado", e acrescenta que este tipo de redes possuem taxas de transmissão moderadas, no sentido de as distinguir das redes de dados de alta velocidade.

2.8.1 Características

A nível de requisitos das redes locais podem referir-se os mais importantes considerados pelos projectistas da rede *ethernet,* que apesar de reportarem à década de 70, ainda se encontram válidos a menos de alguns valores.

Estes podem ser resumidos nos pontos que caracterizam as redes locais [Stallings, 84]:

- ▷ Taxas de transmissão elevadas (0.1 a 100 Megabits por segundo)
- ▷ Distâncias curtas (0.1 a 50 quilómetros)

- ▷ Reduzida taxa de erro de transmissão (10^{-8} a 10^{-11})

2.8.2 Classificação dos métodos de acesso

A classificação mais utilizada distingue os métodos de acesso ao meio físico em protocolos de acesso aleatório ou competitivos e protocolos de acesso controlado [Stallings, 84].

Esta estruturação faz parte de um conjunto mais vasto, que caracteriza todas estas técnicas de acesso como sendo de divisão no tempo, por oposição à divisão na frequência. Estes métodos podem ainda ser classificados relativamente à topologia utilizada (*bus* ou *ring*), ou relativamente ao tipo de controlo (centralizado ou distribuído).

2.8.2.1 Protocolos de acesso aleatório

Nos protocolos de acesso aleatório, se não existir qualquer tipo de coordenação entre as várias estações, podem ocorrer colisões entre mensagens enviadas por fontes diferentes. Entre estes protocolos existe ainda a distinção relativamente à forma como é realizada a partição de estações autorizadas em aceder ao meio num dado instante [Pleinevaux, 90]:

- ▷ Partição probabilística - Exemplos desta classe são os protocolos ALOHA, *slotted* ALOHA, CSMA não persistente e CSMA p-persistente.

- ▷ Partição por endereços - As estações são organizadas em árvore pelo seu endereço de modo a existir uma ordem pré-determinada para resolução de colisões. Por exemplo o CSMA-DCR.

- ▷ Partição no tempo - Nesta classe englobam-se os protocolos Window CSMA (quando surge uma colisão o acesso é controlado por meio de janelas temporais) e Virtual Time CSMA.

Os protocolos de partição probabilística encontram-se descritos e a sua performance avaliada em [Tanenbaum, 88]. Os restantes estão presentes em [Arvind, 91] e serão discutidos posteriormente.

2.8.2.2 Protocolos de acesso controlado

Os protocolos de acesso controlado são normalmente subdivididos em protocolos em que a atribuição é ou não pré-determinada. No primeiro grupo encontra-se o TDMA (*Time Division Multiple Access*), que divide o tempo em intervalos que são atribuídos de forma estática às diferentes estações.

Os protocolos sem atribuição prévia permitem que as estações abdiquem do seu direito de transmissão, sendo esse intervalo aproveitado, o que se traduz numa vantagem de eficiência. Dentro destes podem distinguir-se duas subclasses: protocolos com reserva e protocolos com mecanismo de *token*.

2.8.2.2.1 Protocolos com reserva

Estes protocolos possuem duas fases distintas: uma fase em que efectuam uma reserva para posterior transmissão e uma fase de transmissão dos dados propriamente dita.

2.8.2.2.2 Protocolos com mecanismo de *token*

Nestes casos, o acesso é regulado pela posse de um pacote especial denominado *token*, que é transmitido sucessivamente entre estações de forma implícita ou explícita.

2.8.2.3 Critérios de escolha

Os critérios que presidem à opção por um dos mecanismos de acesso ao meio são (sem estarem ordenados por ordem de importância):

- Topologia, configuração do *layout*.
- Complexidade.
- Custo.
- Tipo de controlo - centralizado / distribuído.
- Fiabilidade.

- ▷ Ser um *standard* (ou compatível).
- ▷ Exigências temporais.

2.8.3 Normas IEEE

As aplicações que recorrem a redes locais são inúmeras, interligando os mais diversos equipamentos (não só computadores). O IEEE propõe vários *standards* nesta área, em que os mais relevantes para a discussão são:

- ▷ 802.2 - Subcamada LLC.
- ▷ 802.3 - Subcamada MAC CSMA/CD.
- ▷ 802.4 - Subcamada MAC *Token-bus*.
- ▷ 802.5 - Subcamada MAC *Token-ring*.

A justificação do atributo subcamada reside no facto do seu conjunto (LLC e MAC) corresponder à camada dois, de ligação de dados do modelo OSI, proposto pela ISO. Uma análise mais detalhada destes *standards* associados às redes locais pode ser encontrada em [Wood, 85].

É de referir que estes *standards* estão em permanente evolução, como, por exemplo, o normalmente denominado 802.3u para integrar a *Fast Ethernet*. Surgiu também recentemente outro *standard* nesta área, o 802.12, que regulamenta o *100VG-AnyLAN*. Estes desenvolvimentos recentes revestem-se de extrema importância, dado que o mercado tem forçado e respondido ao desafio, pelo que são propostas a considerar atentamente. No entanto, a discussão destas propostas terá lugar posteriormente, devido à ainda pouca bibliografia dedicada a este assunto. A comparação será realizada com a rede *ethernet* a 10 Mbps.

A distinção entre as diversas propostas a nível do utilizador final assentam essencialmente na topologia e no mecanismo de acesso ao meio (subcamada MAC), realçando que a subcamada LLC é partilhada pelas diferentes subcamadas inferiores, de modo a que a imagem transmitida para as camadas superiores seja idêntica. As topologias mais comuns são estrela, anel, barramento e árvore (o barramento é um caso particular da topologia em árvore) [Stallings, 84].

Verifica-se, numa primeira análise, que estas propostas podem satisfazer os requisitos impostos pelas redes intercelulares, pelo que existem todas as vantagens associadas à sua utilização, dado terem sido objecto de normalização.

Dada a relevância do mecanismo de acesso ao meio no desempenho global da solução e na distinção das diversas propostas normalizadas, é importante realizar uma análise mais detalhada.

2.8.3.1 *Ethernet* e 802.3

Por vezes, existe alguma confusão entre a rede *ethernet* original (2.94 Mbps), actual (10 Mbps) e o *standard* proposto pelo IEEE, o 802.3. Uma perspectiva da evolução pode ser encontrada em [Shoch, 82]. Além disso, existem duas versões de *ethernet* a 10 Mbps, propostas pelo grupo de companhias usualmente denominado DIX (DEC, Intel e Xerox). A segunda versão é praticamente idêntica ao *standard* IEEE, sendo normalmente ignorada em termos de mercado [Leong, 88]. As diferenças para a versão I residem na interface entre controlador e *transceiver*.

Existem diferenças pouco significativas no formato dos pacotes entre a *ethernet* a 10 Mbps e o *standard* IEEE 802.3. As diferenças residem no cabeçalho dos pacotes. De referir, que os protocolos TCP/IP e DECnet utilizam o formato *ethernet* versão II e não o proposto no *standard*.

No entanto, como as diferenças são ínfimas, o termo *ethernet* também será usado para denominar o *standard* IEEE neste estudo, como acontece normalmente na bibliografia.

2.8.3.1.1 Método de acesso ao meio

A *ethernet* regula o acesso a um meio de acesso múltiplo e *broadcast* (a transmissão é escutada por todos os nós que são passivos). Possui um mecanismo de acesso CSMA/CD *(carrier sense, multiple access with collision detection)* persistente-1 assíncrono (assíncrono porque não há qualquer tipo de restrição ao instante de acesso).

Carrier sense advém do facto de cada nó escutar o meio antes de iniciar a transmissão, só transmitindo se estiver livre, com probabilidade unitária. Como dois nós podem começar a transmitir ao mesmo tempo (ou separados de um tempo máximo equivalente ao tempo de propagação), existe a possibilidade de ocorrência de uma colisão. Quando a colisão é detectada, a estação:

- ▷ Interrompe a transmissão.

- Transmite um intervalo curto de ruído *(jam)*, para notificar todas as outras estações.

- Escalona o pacote para retransmissão num intervalo de tempo aleatório *(backoff)*.

O algoritmo de retransmissão usado é o *truncated binary exponential backoff*. Isto significa que o intervalo médio de retransmissão é duplicado cada vez que ocorre uma colisão sucessiva com um pacote. Para evitar atrasos muito extensos o crescimento exponencial é abandonado *(truncated)* à décima tentativa, baseado no facto da especificação só admitir um máximo de $2^{10} = 1024$ estações por rede. Após 16 colisões, o pacote é descartado.

2.8.3.1.2 Características

A topologia é tipicamente em barramento ou em árvore, mas pode assumir topologias em estrela. Existem diversas variantes a 10 Mbps:

- 10base2: O meio físico é o cabo coaxial fino de 50 ohm. Também denominada *thin ethernet* ou *cheapernet*. Comprimento máximo de 185 metros.

- 10base5: O suporte é o cabo coaxial *standard* (grosso) de 50 ohm. Comprimento máximo de 500 m.

- 10baseT: Transmissão sobre par torcido sem blindagem, com comprimento que não pode exceder os 150 metros. A topologia é estrela.

- 10baseF: Versão em fibra óptica.

Os valores indicados referem-se a distâncias máximas sem repetidores.

2.8.3.2 *Token-bus*

Esta norma direccionada para os sistemas de fabrico, constitui a subcamada inicial da norma MAP, que teve como grande impulsionador a General Motors.

A topologia em barramento e a existência de vários níveis de prioridade, foram parte dos requisitos de partida a que esta norma teve que obedecer. A topologia em barramento adapta-se melhor aos *layouts* existentes e o facto de ocorrer uma ruptura no cabo não implica necessariamente que a totalidade da rede não funcione, ao contrário da topologia em anel. A

necessidade de vários níveis de prioridade prende-se com o facto de coexistirem em ambiente fabril, mensagens com criticalidade muito distinta. A norma 802.4 define 4 níveis de prioridade (0, 2, 4, e 6).

As estações estão organizadas em anel lógico, cuja sequência é independente da posição física ocupada no barramento, já que o meio é *broadcast*. O tempo máximo de serviço está assim perfeitamente estabelecido.

A complexidade deste *standard* é muito elevada, em que cada estação tem que possuir dez temporizadores diferentes e mais de duas dúzias de variáveis de estado. Além disso, é necessário prever as situações de inserir ou retirar uma estação no anel lógico, e de perda do testemunho.

As taxas de transmissão possíveis são de 1, 5 e 10 Mpbs.

2.8.3.3 *Token ring*

Esta norma regula um conjunto de ligações ponto a ponto organizadas em forma de anel. Com esta topologia torna-se simples a confirmação de transmissão (*acknowledge*) pois basta a alteração de apenas um bit do pacote, no receptor. Posteriormente, o emissor recolhe a mensagem enviada. Por outro lado, não impõe restrições ao tamanho máximo dos pacotes.

O tempo máximo de acesso ao meio físico é bem definido, e não varia com os níveis de utilização da rede. Assim, a sua eficiência é muito baixa se por exemplo, só houver uma estação com pacotes para transmitir, enquanto sob carga elevada, a eficiência pode atingir valores próximos da unidade.

Possui oito níveis de prioridades, mas o mecanismo é diferente do *token-bus*. Existem 3 bits no *token* que são utilizados para indicar a prioridade da próxima transmissão, pelo que só se podem alterar se a transmissão de uma dada estação for mais prioritária. Assim, uma estação pode não conseguir nunca aceder ao meio, se existirem transmissões prioritárias continuamente, o que não é possível no *token-bus*.

2.8.4 Comparação entre redes locais

A análise de performance da rede *ethernet* tem merecido grande atenção e foram realizados vários estudos práticos e teóricos que serão referidos com mais detalhe posteriormente. Dadas as

particularidades do seu mecanismo de acesso, nomeadamente o tempo de espera aleatório aquando da ocorrência de colisão, e o grande número de variáveis envolvido, os estudos já realizados apresentam diferentes pontos de vista, provocados pelas simplificações utilizadas e configurações adoptadas.

Desta forma, torna-se complexo estabelecer uma comparação consensual entre os mecanismos de acesso. No entanto, existem alguns pontos de índole qualitativa presentes nos estudos realizados que não merecem discussão, como sejam o menor tempo de espera do mecanismo CSMA/CD quando sujeito a cargas reduzidas, e o valor potencialmente mais elevado aquando de cargas maiores. Acresce a este facto, a imprevisibilidade deste atraso atestada pela crescente variância com o aumento da carga no caso CSMA/CD.

A performance deste método de acesso ao meio depende largamente da razão entre tempo de propagação e tempo de transmissão como demonstrado em [Stallings, 84a]. Este facto pode ser explicado qualitativamente pela importância do intervalo de tempo em que podem ocorrer colisões. Por outras palavras, o intervalo de tempo em que é possível iniciar outra transmissão, que resultará numa colisão, sem que tenha sido detectada outra ou outras mensagens presentes no canal. Este intervalo revela-se fundamental para a probabilidade de ocorrência de colisões e consequentemente para a performance.

Os resultados obtidos dependem também em grande parte das condições ensaiadas, nomeadamente a distribuição usada para a entrada. Em [Bux, 81] são consideradas distribuições exponenciais e hiperexponenciais, que atestam os comentários já tecidos acerca da independência do desempenho relativamente à carga e distribuição desta dos métodos *token-ring* e *token-bus*.

Como regra prática, é defendido que o método de acesso CSMA/CD se comporta idealmente, por outras palavras, com atraso praticamente nulo, para quocientes de dois a cinco por cento, entre o tempo de propagação e o tempo de transmissão de um pacote.

Uma análise mais alargada, incluindo outros factores relevantes para a performance como, por exemplo, os problemas temporais associados ao controlador de rede pode ser encontrada em [Bux, 84], além do estudo de uma aplicação concreta consistindo no acesso a um *file server* partilhado por várias estações.

Em [Sastry, 85] é demonstrado que a performance das redes locais pode estar muito aquém da característica ideal, por exemplo, pelo atraso introduzido pela interface e pelo atraso de propagação. Assim, são encontrados valores máximos de *throughput*, tendo em linha de conta os factores referidos, que se afastam acentuadamente dos valores máximos potenciais atingidos quer pelo *token-bus* quer pelo *token-ring*, enquanto que no caso do CSMA/CD este facto já não se

verifica. Em parte, isto deriva da lógica da *ethernet* ser simples e em grande parte analógica. No entanto, com a evolução do *hardware* este inconveniente foi sendo minorado.

A modelização de uma rede local para estudos de performance tendo em conta não só o tempo de transmissão é realizada em [Mitchell, 86].

A *ethernet* tem também como vantagens a simplicidade, a ampla utilização e o facto de permitir ligar e desligar estações sem problemas de reinicialização. A principal desvantagem resulta do não determinismo e da possibilidade de saturação. O facto do tamanho mínimo do pacote ser 60 bytes também é apontado como desvantagem face às outras propostas.

O *token-bus* e o *token-ring* possuem mecanismos de suporte de prioridades, campo em que o primeiro é superior. A complexidade e a eficiência para utilizações reduzidas são as principais desvantagens.

Outra desvantagem do *token-ring* no capítulo da fiabilidade e tolerância a falhas reside na existência de um monitor centralizado.

A eficiência para níveis de utilização muito exigentes aconselha as opções reguladas por *token* para aplicações que prevejam necessidades de largura de banda elevadas. Finalmente, a variável custo é favorável à *ethernet* relativamente ao *token-ring,* e extremamente favorável relativamente ao *token-bus*.

2.8.5 Subredes

A decisão acerca da arquitectura de rede a utilizar está assim intimamente ligada à aplicação em questão, que poderá realçar as vantagens de uma proposta face às outras. No entanto, podem coexistir várias subredes dentro de um mesmo nível hierárquico do sistema de fabrico, e estas não precisam ser obrigatoriamente do mesmo género. Em qualquer dos casos, recorre-se à utilização de *gateways* para interligar as várias subredes, existindo usualmente uma rede comum, denominada *backbone*. As vantagens da subdivisão em várias subredes são uma melhor fiabilidade e performance [Pimentel, 90], já que os diversos subsistemas podem falhar independentemente e não dependem do *backbone,* e o tráfego é dividido. As desvantagens residem no maior tempo de transmissão entre os diversos subsistemas, além do maior custo e maior complexidade associados, principalmente se os protocolos e redes forem distintos.

2.9 Conclusões

O projecto da arquitectura de rede tem como pressuposto o conhecimento detalhado da aplicação e das suas particularidades. Torna-se assim complexa a tarefa de propor uma arquitectura genérica para qualquer dos níveis hierárquicos de um sistema fabril já mencionados.

Concretamente, este estudo incide sobre as camadas de oficina e célula, reportando ao modelo proposto pela ISO. Apesar de ser possível encontrar um conjunto de requisitos global que caracterize estes níveis, não é de forma alguma suficiente para defender uma solução única.

Numa perspectiva funcional, os procedimentos associados a estes níveis, considerando uma estrutura de controlo global, correspondem ao controlo e monitorização do processo produtivo, podendo também incluir tarefas de escalonamento e atribuição dos recursos fabris.

Por outro lado, os requisitos de comunicação impostos dependem em grande parte da arquitectura de controlo implementada numa dada aplicação. Naturalmente, estas têm evoluído também, sujeitas às influências determinadas pelas redes de comunicação.

No entanto, não se pode isolar esta rede do restante contexto. Além de satisfazer os requisitos, deve permitir a fácil interligação com os restantes níveis e aplicações existentes no sistema fabril.

Pretendeu-se contextualizar a utilização de redes de comunicação nos sistemas de fabrico e demonstrar o seu papel fundamental como elemento que permite a integração. Deste modo, as redes locais, que foram objecto de normalização, surgem como propostas muito válidas para atingir o objectivo pretendido.

Capítulo 3

Caracterização e alteração da rede *ethernet*

3.1 Introdução

A transferência eficiente de informação entre os vários níveis presentes num sistema fabril é fundamental para assegurar a competitividade. Os requisitos a que deve obedecer a comunicação variam de nível para nível, nomeadamente em termos de tempo de resposta máximo garantido.

A integração entre os diversos elementos não é facilmente atingida. Uma opção é utilizar a norma MAP. Outra opção consiste na adopção de redes locais, cuja comparação já foi efectuada. Concretamente, a rede *ethernet,* pelas suas características de disponibilidade em todas as plataformas, corresponde aos requisitos já abordados para as redes de suporte aos níveis hierarquicamente mais elevados.

No entanto, a sua utilização em sistemas críticos, que exijam um tempo máximo de comunicação, é impraticável. A aleatoriedade do mecanismo de acesso da rede *ethernet* torna complexa a análise e a defesa perante os seus concorrentes que asseguram o determinismo na comunicação.

Desde logo, dúvidas se levantam acerca da estabilidade da própria rede. As condições sob as quais a rede deixa de oferecer um serviço fiável, em primeiro lugar, e de qualidade, em segundo, são alvo de algum mal-entendido. A fiabilidade do serviço referida não se prende com a transmissão propriamente dita, cuja taxa de erros é extremamente baixa, mas com a possibilidade de um pacote não ser transmitido por excesso de colisões. A qualidade de serviço é dependente dos requisitos da aplicação. No âmbito das redes de comunicação de suporte dos níveis do

sistema de fabrico hierarquicamente mais baixos, esta qualidade assume a forma de tempos máximos de serviço.

O esclarecimento destes pontos, nomeadamente acerca do nível de qualidade que esta proposta de comunicação oferece, revela-se assim importante para a sua utilização em sistemas não críticos. As culpas muitas vezes imputadas à rede pelo fraco desempenho de algumas aplicações serão justificadas?

A vantagem relacionada com o tempo de acesso ínfimo proporcionado pelo método de acesso para regimes de carga reduzidos, consensualmente aceite, assume contornos pouco específicos, e no novo contexto de 100 Mbps implica uma reorganização significativa da escala.

Por outro lado, identificado o principal obstáculo da adopção da rede *ethernet* como elemento integrador de todo o sistema de fabrico, ou seja, a falta de determinismo, será possível ultrapassá-lo?

3.2 Contexto actual

A ampla utilização da rede *ethernet* nos mais diversos locais e como suporte de aplicações muito distintas, permitiu que o seu custo atingisse valores muito reduzidos. O único competidor tem sido o *token-ring* em aplicações ditas de escritório (suportado essencialmente pela IBM) cujo volume de vendas em dinheiro tem sido aproximadamente metade.

No entanto, ao nível de aplicações fabris o seu domínio não é tão claro, devido essencialmente à não existência de uma garantia de cumprimento de *deadline*. Na análise de requisitos já efectuada, o suporte de comunicação tempo-real surge como imperativo. O tempo-real é acima de tudo determinismo [Veríssimo, 94] e não rapidez de resposta.

No grande número de aplicações fabris em que não é imposta esta exigência, esta rede surge como uma proposta extremamente válida. A sua utilização em conjunto com o TCP/IP no projecto EPICS [Delesio, 95], [Lewis, 93](*Experimental Physics and Industrial Control System*) é disto exemplo. Este projecto desenvolveu *software* e um conjunto de funções destinadas à aquisição de sinal, supervisão, monitorização, controlo e sequenciamento de operações. A liderança deste projecto pertence aos grupos *Accelerator Technology* do *Los Alamos National Laboratory* e *Advanced Photon Accelerator* do *Argonne National Laboratory*, incluindo ainda inúmeros fornecedores, instituições de desenvolvimento e universidades.

A inclusão do seu mecanismo de acesso ao meio (CSMA/CD) na norma MAP 3.0, apesar de somente em banda larga, vem de encontro a esta tendência. A outra alternativa existente nesta norma, o *token-bus,* só tem alguma expressão neste género de aplicações, sendo extremamente mais cara e a sua utilização assume contornos muito mais complexos.

Por outro lado, têm surgido inúmeras propostas para a alteração do mecanismo de acesso de modo a tentar atingir o objectivo final: o tempo-real. Neste ponto, importa referir que este conceito pode assumir um grau de exigência diferente, de acordo com a criticalidade do sistema. Assim, pode justificar-se probabilisticamente o uso da rede *ethernet* em sistemas de criticalidade reduzida [Hutchison, 87].

Como exemplo máximo da modificação do mecanismo de acesso de modo a garantir determinismo na comunicação temos o sistema tempo-real distribuído MARS. A comunicação é efectuada sobre TDMA *ethernet*, que é replicada. Cada nó só está autorizado a aceder ao meio físico, num dado intervalo de tempo.

É de salientar que recentemente têm surgido várias propostas de alteração da *ethernet* pela crescente relevância do conceito de multimédia. Visto tratar-se de uma aplicação que exige comunicação em tempo-real (*soft*) e de esta ser sem dúvida a rede mais implantada globalmente (setenta milhões de utilizadores segundo [English, 96]).

3.3 *Ethernet* a 100 Mbps

Outro factor extremamente importante no uso desta rede, e que justifica a continuidade dos estudos sobre a mesma, é o surgimento da rede *ethernet* a 100 Mbps. Além disto, está já em fase de desenvolvimento o *standard* com cadência de 1Gbps, por parte de um consórcio composto essencialmente por fabricantes, e previsto pelo IEEE como norma para o fim de 98.

Relativamente à taxa de 100 Mbps existem dois *standards*: *Fast Ethernet* (IEEE 802.3u) e *100VG-AnyLAN* (IEEE 802.12). A sua adopção continua a crescer a ritmo muito acelerado, contrariando alguns analistas que vaticinavam a popularização do ATM. Uma comparação entre *ethernet* a 10 Mbps e ATM em aplicações de transmissão de imagens pode ser encontrada em [Kara, 94]. No entanto, o ATM ainda não é suportável financeiramente, nem de fácil implementação para aplicações de escritório [English, 96].

De acordo com números recolhidos pelo mesmo autor [English, 96], até ao fim do ano de 96 haverá 4,2 milhões de computadores a usar a *Fast Ethernet* e 780.000 a usar a *100VG-AnyLAN*. Para 97 as previsões são de 10,6 e 1,7 milhões de utilizadores, respectivamente.

A *Fast Ethernet* é essencialmente uma evolução relativamente ao seu antecessor, sendo facilmente interligavel com as redes existentes a 10 Mbps.

A norma *100VG-AnyLAN* possui um mecanismo de prioridades que a torna mais vantajosa para aplicações em que o tempo de resposta é importante, como, por exemplo, aplicações multimédia, mas a sua implementação é mais complexa. É de referir ainda a existência de suporte do formato de pacote da norma *token-ring*. A topologia suportada resume-se à topologia em estrela, em que existe um elemento que congrega todas as ligações (*hub*), à semelhança do que acontece com a variante 10baseT.

O preço das placas *Fast Ethernet* está a convergir rapidamente para o preço da versão de 10 Mbps, a que não será alheio o facto de os fabricantes de *hardware* passarem a fabricar controladores de 10/100 Mbps, em vez de 10 Mbps. Este factor permite que a transição entre as duas tecnologias seja gradual. Os preços das placas e *hubs 100VG-AnyLAN* são da mesma ordem de grandeza.

3.4 Desempenho da rede *ethernet*

Devido às vantagens evidenciadas pela rede *ethernet* (não esquecendo o aparecimento da taxa de 100 Mbps), dadas as poucas certezas acerca do seu desempenho "real", e inclusivamente acerca da sua estabilidade, faz todo o sentido tentar esclarecer estes pontos.

3.4.1 Estudos anteriores

No relatório original acerca da *ethernet* (2,94 Mbps) [Metcalfe, 76] são apresentadas algumas fórmulas que caracterizam a sua performance. O valor mais relevante obtido analiticamente é o de cerca de 37% (1/e) para o *throughput* máximo da rede para os pacotes de tamanho mínimo. Para pacotes considerados grandes (512 bytes) obtém-se um valor próximo da unidade.

Esta análise é aprofundada em [Almes, 79], que se centra no tempo de resposta. Para cargas da rede até 75%, o tempo de resposta é inferior a 1ms, se o tráfego for constituído por pacotes

pequenos. Para cargas superiores, o tempo de resposta "converge" para infinito. Com pacotes maiores, a rede suporta cargas mais elevadas, sem aumento significativo do tempo de resposta, mas este é maior para os pacotes de dimensão reduzida (os pacotes maiores ocupam a rede mais tempo e vedam o acesso). Através da simulação, este estudo demonstra que o desvio padrão do tempo de resposta aumenta consideravelmente com a carga a que a rede está sujeita, o que constitui uma grande desvantagem para sistemas de tempo-real.

Um estudo centrado essencialmente sobre o efeito do tamanho dos pacotes no desempenho encontra-se em [Tobagi, 80]. Prova que uma pequena fracção de grandes pacotes é suficiente para atingir valores de desempenho próximos dos atingidos só com grandes pacotes. No entanto, as melhorias não são traduzidas para os pacotes pequenos, que vêm os seus tempos de acesso médio aumentados.

O estudo efectuado por [Meditch, 83] foca os aspectos relacionados com a estabilidade dos mecanismos de acesso ao meio CSMA e CSMA/CD. Através da formulação recorrendo a cadeias de Markov é demonstrado que ambas as soluções não persistentes são instáveis, considerando população infinita e divisão dos instantes de acesso ao meio em intervalos discretos *(slotted)*. No entanto, apresenta um mecanismo que através de controlo distribuído consegue estabilizar as duas opções, com o conhecimento do número de estações bloqueadas. Uma estação bloqueada é uma estação que transmitiu uma mensagem envolvida numa colisão. Finalmente, demonstra que esta política de retransmissão encontrada atinge as melhores características a nível de *throughput* e atrasos. A análise foca o caso não persistente dos dois modos de acesso ao meio, pelo que as suas conclusões devem ser extrapoladas com cuidado para o caso *ethernet*.

Outros dois estudos [Coyle, 83] e [Coyle, 85] sustentam a estabilidade da rede *ethernet* mesmo com grande número de nós e sob cargas elevadas. Este facto deve-se à adaptação do mecanismo de *backoff* ao nível da carga da rede, pois a solução CSMA/CD sem *backoff* é instável. Apresenta como conclusão que desde que o tamanho do pacote seja 25 vezes superior ao tempo de detecção de colisão, a *ethernet* é estável mesmo sob condições de tráfego extremas.

Em [Hutchison, 87], através da simulação pretendeu demonstrar-se que para uma dada carga de transmissão na rede, dependente da aplicação, se conseguiam cumprir *deadlines*, com uma probabilidade elevada. Apesar de não ser adequada para sistemas tempo-real *hard*, a rede *ethernet* atinge tempos de acesso e transmissão próximos de zero para cargas reduzidas, o que é uma grande vantagem face aos sistemas em que o acesso ao meio é regulado por um *token*.

Este estudo analisa ainda o caso em que a utilização é regulada por um mecanismo TDM arbitrado distribuidamente, supondo que as fontes de mensagens são essencialmente periódicas,

concluindo que se trata de um mecanismo justo e que se auto ajusta, só sendo prejudicado pelas emissões aperiódicas. Por outras palavras, deve realizar-se o escalonamento dessas fontes de maneira a desfasá-las temporalmente, o que é conseguido após um período inicial, escalonando as fontes a partir da última transmissão com sucesso. [Hutchison, 87] demonstra que o comportamento deste modo de operação é muito eficaz depois de atingida uma situação de equilíbrio, só sendo perturbado pelas fontes assíncronas, e isto sem nenhum tipo de controlo centralizado.

Defende ainda a utilização da *ethernet* para transmissão de dados tempo-real e demonstra, recorrendo à simulação, que a probabilidade de não cumprimento de *deadlines* é baixa (dependendo das características da aplicação). Isto verifica-se desde que a utilização do canal não exceda cerca de 50% como valor típico, o que numa aplicação industrial, sem transmissão de imagem, é geralmente suficiente e suporta um grande número de nós.

O estudo essencialmente experimental descrito em [Boggs, 88] foi um marco importante porque realiza um resumo dos estudos teóricos feitos até então e tece comentários acerca das hipóteses simplificativas que foram assumidas nesses estudos. Além disso, apresenta um conjunto extenso de medidas experimentais, com várias combinações dos parâmetros que afectam a performance da rede *ethernet*. Analisa em particular o caso do mecanismo de acesso da rede *ethernet* (*unslotted*, persistente-1 CSMA/CD), debruçando-se em configurações que considera realistas, e não nos casos limites da conjugação de parâmetros adversos. A plataforma de teste está descrita na figura 1.

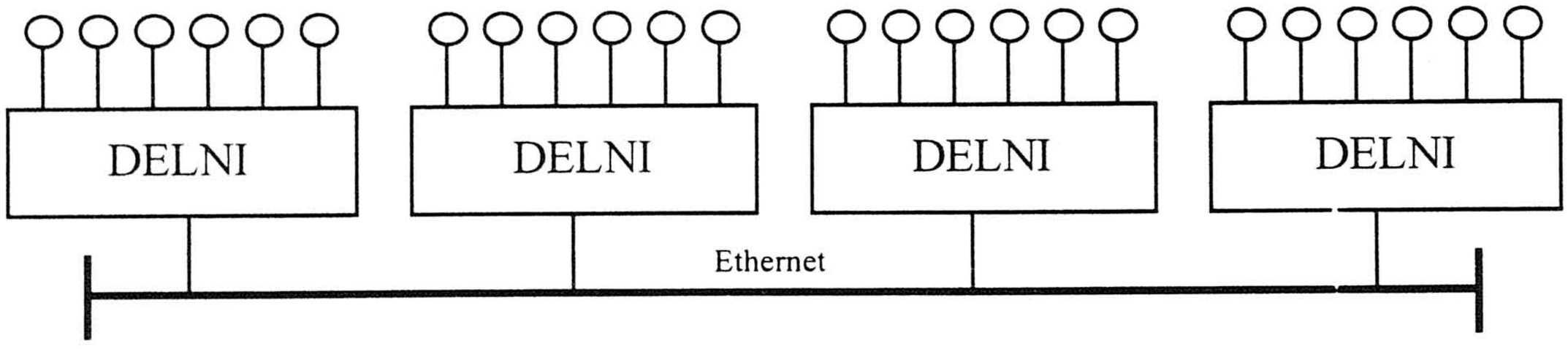


Fig. 3.1 - Configuração Experimental

O estudo resume algumas regras práticas resultantes dos estudos efectuados são:

- ▷ Não instalar cabos longos.
- ▷ Não colocar muitas estações no mesmo segmento de rede.
- ▷ Implementar correctamente o protocolo.

- ▷ Usar tamanhos grandes para os pacotes.

- ▷ Não misturar aplicações com requisitos muito distintos, pois não é possível garantir simultaneamente a maximização da taxa de transferência e a minimização do acesso ao meio.

Em [Boggs, 88] é publicado um conjunto extenso de medidas e conclui-se que a rede *ethernet* é adequada para aplicações com elevadas necessidades de transmissão. Demonstra que o mito do 37% como valor máximo da utilização para a *ethernet* não corresponde à realidade. Sustenta que se essas necessidades não superarem frequentemente os 10 Mbps, então a *ethernet* não é o estrangulamento.

Além disso, [Boggs, 88] defende que a rede é estável sob qualquer regime de carga. As únicas causas que podem provocar a sua saturação são falhas de *hardware* ou de *software* que geram cargas acidentalmente elevadas. Para aplicações onde o tempo de resposta assume maior relevância, alega que a *ethernet* pode ser uma opção desde que o número de nós seja diminuto e desde que haja poucas aplicações a exigirem larguras de banda elevadas.

Em [Gonsalves, 88] encontra-se a análise do efeito provocado pela distribuição dos terminais ao longo da rede. Os estudos anteriores assumiam os nós igualmente espaçados. Demonstra que, neste caso, as estações localizadas perto do centro são privilegiadas e que a criação de *clusters* de tamanho idêntico não se traduz em diferenças significativas. Criando *clusters* de tamanho diferente, verifica-se que os nós pertencentes aos *clusters* menores são penalizados em termos de serviço. A justificação deriva do facto das colisões entre estações do mesmo *cluster* serem mais rapidamente resolvidas que as entre *clusters*. Deste modo, os membros do grupo mais reduzido têm que competir com mais nós "distantes".

Recorrendo à simulação, [Armyros, 92] realiza um conjunto muito extenso de experiências que só encontra paralelo em [Boggs, 88]. De referir algumas das conclusões mais importantes deste estudo:

- ▷ A performance depende do número de nós. Sistemas com menos estações obtêm piores valores de performance sob cargas elevadas e a injustiça entre estações é superior.

- ▷ Os pacotes pequenos provocam mais colisões (a taxa de transmissão dos pacotes é aumentada de um factor equivalente ao decréscimo do tamanho dos pacotes).

- ▷ Se for arbitrado um intervalo entre transmissões sucessivas de um mesmo nó, ligeiramente superior ao *round-trip time* (duas vezes o tempo de propagação máximo), a performance vem melhorada.

O estudo descrito em [Whetten] incide sobre o denominado *packet starvation effect*, mas cuja denominação mais corrente é efeito de captura. Para a resolução deste problema propõe um novo mecanismo de acesso ao meio, o *Fair Dual Distributted Queue*, que é simples e pode ser facilmente implementado como alternativa ao actual. Consiste na criação de duas filas *first-came, first-served* com prioridades distintas aquando da ocorrência de uma colisão. Neste modo apelidado congestionado (*congested*), o acesso é regulado através de um mecanismo de reserva (*ordering slots*). Advoga que o efeito de captura limita a utilização da rede *ethernet* a cerca de 60% a 70% e que caso este fosse removido se poderia atingir utilizações até perto dos 95%.

As características de tráfego simuladas em [Whetten] resultaram de medições apresentadas em [Gusella, 90]. Este efeito provoca que alguns pacotes sofram elevadas latências para cargas tão baixas como 40%, e alguns pacotes deixam de ser transmitidos para cargas de 60%, depois de 16 tentativas. Os resultados apontam que a latência média evolui quase linearmente com a utilização, mas o desvio padrão aumenta consideravelmente.

Em [Whetten] encontram-se alguns valores indicativos muito úteis; por exemplo, para a utilização da *ethernet* em sistemas tempo-real *hard*, caracterizando-os como não permitindo atrasos superiores a 50 milisegundos, é necessário manter a utilização abaixo dos 40%. Para não degradar consideravelmente o tráfego TCP/IP, ou seja, para respeitar os valores indicados por [Jacobson, 88], que aponta como limite a existência de atrasos superiores a 100 milisegundos para 1% dos pacotes, torna-se imperioso manter a utilização abaixo dos 75%.

Em [Molle, 94] é realizada uma abordagem que defende um protocolo MAC diferente para fazer face aos novos desafios colocados à rede *ethernet*; ou seja, o aumento substancial da capacidade de processamento dos equipamentos que tornaram a rede *ethernet* no ponto de estrangulamento em sistemas com grandes exigências em termos de quantidade de informação. Além disso, reafirma a injustiça no acesso ao meio provocada pelo algoritmo *Binary Exponential Backoff* (BEB) e analisa o efeito de captura do canal que atribui à actualização independente do contador de colisões em cada terminal. Resumidamente, dado que o valor do contador vai penalizar o montante de tempo disponível para a tentativa de retransmissão, um terminal "vencedor" aquando da ocorrência de uma colisão, vê o seu contador colocado a zero e assim beneficia de melhores hipóteses nas colisões posteriores. No entanto, demonstra que o efeito de captura pode melhorar a performance *(throughput)* total em certas circunstâncias.

Pelo facto do algoritmo de acesso ao meio beneficiar o menor valor do contador de colisões, o que equivale praticamente a uma política de *last come-first served*, a variância dos atrasos de transmissão com sucesso vem agravada [Molle, 94]. Esta particularidade da rede torna-se uma grande desvantagem para sistemas de tempo-real. O mesmo autor aponta a rede *ethernet* como sendo um sistema caótico, dado que a sua performance depende de:

- Topologia exacta (afecta atrasos de propagação).
- Instantes de geração de tráfego (determina colisões com a topologia).
- Dados históricos do canal (comprimento das filas e contadores de colisões).

Se ainda se somarem os factos de o padrão de geração de tráfego ser imprevisível, a existência de mecanismos de *timeout* e retransmissões implementados pela camada de transporte e as características particulares da interface com a rede, chega-se à conclusão anterior do carácter caótico da rede *ethernet*. [Molle, 94] defende ainda que o mecanismo de BEB é que condiciona a performance da rede. As insuficiências do algoritmo derivam essencialmente do facto da decisão de acesso ao meio não entrar em linha de conta com o estado actual do canal e dos outros participantes. Advoga um algoritmo de *backoff* cujo período de adaptação a transitórios é logarítmico em vez de linear como o BEB. Sustenta que as alterações só devem ser realizadas na actualização do contador de colisões se estas o forem em todos os terminais aquando da ocorrência de uma colisão, mesmo que não seja com um pacote seu.

Com o algoritmo proposto, a variância do atraso vem reduzida e não há problema de coexistência entre os dois algoritmos na mesma rede [Molle, 94]. Esta proposta está a ser considerada para inclusão no *standard* proposto pelo IEEE.

Em [Seifert, 95] analisa-se principalmente o efeito de captura e a sua influência em protocolos de alto nível, concretamente o NFS. Avalia as consequências da perda de um pacote nestes protocolos. A perda de um pacote ao nível da rede por *starvation* traduz-se numa carga computacional significativa pelos mecanismos que asseguram a fiabilidade da transmissão. Apresenta uma discussão sobre como quantificar correctamente a carga numa rede. Na sua opinião o número de colisões não é uma medida fiável da utilização da rede, pois as colisões e a sua resolução não ocupam muita largura de banda. Debate o conceito de utilização, e conclui que esta tem que ter associada um intervalo de tempo para ser correctamente definida.

Aponta alguns valores experimentais *rule-of-thumb* para quantificar um excesso de utilização, para o contexto das aplicações denominadas de escritório:

- Utilizações médias superiores a 10-20% durante as 8 horas de trabalho.

- ▷ Utilizações médias superiores a 20-30% durante a pior hora do dia.
- ▷ Utilizações médias superiores a 50% durante os 15 minutos piores.

3.4.2 Comentários

A análise da rede *ethernet* é uma tarefa complexa, devido ao facto de o seu mecanismo de acesso ao meio introduzir intervalos de tempo aleatórios, pelo que, apesar dos inúmeros estudos realizados, torna-se difícil estabelecer consensualmente valores para a sua performance.

Os resultados obtidos variam com as simplificações assumidas inicialmente de modo a tornar viável a tarefa no caso de estudos analíticos e de simulações. Por outro lado, regra geral, os estudos incidem no caso mais desfavorável, o que provoca a obtenção de valores extremamente penalizantes. No caso de estudos experimentais as limitações residem normalmente na topologia ou topologias adoptadas.

Alguns dos estudos referidos não se debruçam exactamente sobre o caso *ethernet*, analisando algumas variantes CSMA/CD, pelo que é preciso usar com precaução os resultados obtidos.

A somar à complexidade do sistema analisado, ainda é necessário definir a função de entrada, ou seja, a caracterização do tráfego a que a rede vai estar sujeito. Não se trata só de uma questão de carga total, pois a cadência e o tamanho dos pacotes influenciam de forma determinante os resultados atingidos. Assim, é importante considerar as particularidades de uma aplicação concreta ou caracterizar um conjunto de aplicações semelhantes de modo a reduzir a complexidade da análise.

Por tudo isto, torna-se difícil estabelecer uma comparação correcta com os outros mecanismos de acesso, nomeadamente os outros *standards* IEEE *token-bus* e *token-ring*, cujo comportamento não sofre dos problemas decorrentes do não determinismo.

3.4.2.1 Justiça

Outro dos aspectos que é importante focar é a avaliação da "justiça" no acesso ao meio, ou seja, se todos os nós têm as mesmas probabilidades de atingir sucesso nas suas transmissões. Está demonstrado em [Boggs, 88] e [Gonsalves, 88] que esta probabilidade varia com a posição ocupada pelas estações no barramento, e com a posição relativa das outras estações, pelo que

não se trata de um protocolo justo. Por outro lado, o efeito de captura também introduz distorções na probabilidade de sucesso de transmissão entre nós.

3.4.2.2 Colisões

O intervalo de tempo em que é possível ocorrer uma colisão é extremamente relevante para o desempenho atingido. A minimização deste intervalo reflecte-se obviamente numa melhoria de desempenho. Isto pode ser conseguido através da redução do comprimento do cabo (segmentação).

O tempo de serviço praticamente nulo para tráfego reduzido é uma grande vantagem face aos concorrentes já referidos. Nesta situação, a probabilidade de ocorrência de uma colisão é diminuta, mas é importante frisar que o facto de isto se verificar não se traduz numa penalização significativa do desempenho, visto a resolução de uma colisão ser efectuada em tempo muito reduzido. O valor máximo para o intervalo de *backoff* da primeira colisão é de 51,2 microsegundos.

A probabilidade de colisão é um valor extremamente difícil de quantificar, mas só acontece quando duas estações começam a transmitir simultaneamente num intervalo de tempo equivalente ao atraso de propagação entre elas, ou seja, no pior caso 20,6 microsegundos. A detecção da colisão é realizada, no pior caso, no dobro deste tempo. A probabilidade de ocorrência de colisões sucessivas entre os mesmos pacotes vai sendo gradualmente reduzida. No entanto, pode resultar de conflitos com outros pacotes provenientes de outras estações, que é o caso em que não há justiça na probabilidade de acesso ao meio, origem do efeito de captura.

Verifica-se assim a importância dos factores que condicionam o tempo máximo de propagação entre estações, concretamente, o comprimento do cabo. No entanto, as colisões resultam, na maioria das situações, do facto de se tratar de um mecanismo de acesso com persistência unitária, pelo que se a rede estiver ocupada as tentativas de acesso serão efectuadas logo após o fim de transmissão. É este factor, essencialmente, que provoca as diferenças obtidas para o desempenho, com tamanhos diferentes de pacotes.

3.5 Efeito de captura

O efeito de captura do canal é consequência directa do mecanismo de *backoff* que penaliza gradualmente as mensagens que estão envolvidas em colisões, pelo que a estação que vence o

conflito tem uma probabilidade acrescida na transmissão de pacotes consecutivos, porque o seu contador de colisões é colocado a zero. Por outro lado, provoca uma redução na probabilidade de sucesso das mensagens que colidem face a novas mensagens pelo mesmo facto.

O efeito de captura pode até ser vantajoso em termos de taxa de transferência (*throughput*) global do sistema, mas introduz assimetrias aleatórias entre estações que não podem por isso ser aproveitadas para estabelecer implicitamente um mecanismo de prioridades. De salientar que esta medida de performance (*throughput*) não assume papel preponderante nos sistemas de tempo-real, sendo mais relevante o atraso máximo.

O termo *packet starvation effect,* também utilizado, vem do facto de alguns pacotes não obterem sucesso de transmissão, mesmo depois de 16 tentativas e por isso serem descartados, enquanto outros pacotes experimentam atrasos reduzidos. Trata-se de mais uma injustiça criada pelo mecanismo de acesso ao meio, concretamente da política de retransmissão. Outra análise detalhada deste efeito está presente em [Molle, 94] (que será referido posteriormente com mais pormenor); [Armyros, 92] pode ser consultado para uma explicação mais sucinta.

3.6 Utilização em sistemas de tempo-real

Afasta-se normalmente a hipótese de utilização da rede *ethernet* para sistemas tempo-real, pois não é possível garantir *deadlines* a nível da comunicação com probabilidade unitária. Em sistemas tempo-real não críticos *(soft real-time)*, em que o atraso ou perda de um pacote não é significativo, as vantagens da rede *ethernet* podem justificar a sua utilização. No entanto, mesmo nestes casos é importante conhecer a possibilidade de saturação da rede, que compromete a estabilidade do sistema de comunicação, pois os aspectos decorrentes destas situações podem assumir proporções gravosas para o sistema.

O efeito de captura surge como um dos principais factores de instabilidade, pois pode provocar a perda de pacotes, o que acontece depois de atrasos máximos significativos de retransmissão (a partir da décima tentativa o valor máximo é 52,4 milisegundos). Estes valores acumulados excedem o limite do tolerável para aplicações fabris, além de implicarem no caso da perda do pacote, um esforço suplementar de processamento.

Este efeito provocado pela evolução do *hardware*, pelo número cada vez maior de estações e pela maior exigência de largura de banda das aplicações, foi diagnosticado em redes com características de tráfego completamente distintas das encontradas em aplicações fabris. De qualquer forma, a tendência é no sentido do crescimento acelerado dos valores necessários ao

suporte destas aplicações. É de relembrar, a importância do tempo de resposta neste tipo de aplicações relativamente à capacidade total.

O facto do efeito de captura acrescentar mais um grau de variabilidade no tempo de resposta, mesmo que não resulte em perda de pacotes, acentua gravemente a maior desvantagem da utilização da rede *ethernet*: o não determinismo. Por isto, mesmo para defender o seu uso em sistemas com exigências *soft* tempo-real, é necessário minimizar a probabilidade de ocorrência deste efeito, o que se traduz numa perda significativa de largura de banda utilizável, apesar de ser complexo estabelecer um valor.

A separação de aplicações com características de tráfego muito distintas, nomeadamente em termos de tamanho dos pacotes, é outra das lições que se retiram dos estudos referidos.

Como conclusão final, pode afirmar-se que não há certezas absolutas acerca do desempenho da rede *ethernet* pois depende da topologia exacta, dos instantes de geração de tráfego e até de dados históricos (contadores de colisões). A discussão efectuada restringiu-se ao mecanismo de acesso, que é uma das parcelas do sistema de comunicação global. A sua influência nas outras camadas que regulam a transferência de dados e a complexidade introduzida por estas, também tem que ser considerada numa aplicação real.

3.7 Propostas de alteração

Além dos estudos de desempenho, foram surgindo ao longo do tempo propostas de alteração do mecanismo de acesso da rede *ethernet*. A avaliação da possibilidade de modificar o mecanismo de acesso, de modo a atingir os requisitos impostos pela comunicação ao nível do tempo de resposta nos sistemas de fabrico, revela-se atractiva. Esta abordagem decorre da tentativa de aproveitamento de redes já implantadas e do baixo custo que esta solução onera.

Pode argumentar-se que algumas das propostas mencionadas são métodos completamente distintos; no entanto, direccionam-se para meios *broadcast* e de múltiplo acesso são sempre susceptíveis de adaptação. Esta adaptação pode envolver vários aspectos que serão referidos posteriormente. De qualquer forma, trata-se quase sempre de propostas CSMA.

As propostas possuem objectivos diferentes e podem resumir-se em três grandes grupos:

- Melhoria de desempenho.
- Integração de prioridades.

- Suporte de comunicação tempo-real.

3.7.1 Melhoria de desempenho

As propostas para atingir níveis mais elevados de performance inserem-se, na generalidade dos casos, na tentativa de maximização da taxa de transferência *(throughput)*. Este facto revela-se particularmente interessante em aplicações sem restrições temporais *(best-effort)*, com grandes quantidades de dados, ou melhor, para aplicações com um grande valor acrescentado. De qualquer forma, permitem um conhecimento mais aprofundado sobre o sistema.

Em [Hansen, 79] é proposto um protocolo CSMA não persistente, no qual o tempo é dividido em intervalos *(slots)* e os nós da rede são agrupados e atribuídos a esses intervalos. Durante o intervalo atribuído ao grupo a que um nó pertence, este escuta o meio e, se não estiver ocupado, começa a transmitir. Senão, o pacote é reescalonado de acordo com um algoritmo aleatório. Ajustando o tamanho dos grupos podem conseguir-se diferentes desempenhos, mais adaptadas à aplicação em questão. No caso limite, em que os grupos só têm um elemento, as colisões são excluídas não havendo desperdício de largura de banda, mas o tempo de espera é máximo.

O estudo descrito em [Liu, 87] apresenta a análise do protocolo Enet II, proposto por Molloy, que procura resolver mais eficientemente a retransmissão necessária após uma colisão. Assim, o acesso ao meio para novas mensagens é condicionado temporalmente por um intervalo que corresponde a três vezes o tempo máximo de detecção de uma colisão, ou de uma transmissão com sucesso; ou seja, duas vezes o chamado "diâmetro" da rede r (tempo máximo de propagação entre duas quaisquer estações). Por outras palavras, uma nova mensagem tem que esperar pelo menos o intervalo de tempo já mencionado, contado a partir do momento em que o canal é encontrado livre. De qualquer forma, este protocolo não impede colisões, que originam retransmissões com probabilidade p, após a espera de mais r unidades de tempo. Este protocolo simples, que não necessita de relógios sincronizados entre os nós de rede, nem de uma ordem pré-definida para estabelecer prioridades implícitas entre estações envolvidas numa colisão, é adaptável aos controladores de rede existentes com algumas modificações. A avaliação do tempo médio de acesso ao meio e da eficiência deste mecanismo é muito complexa e depende de muitos parâmetros, mas para cada caso concreto, é possível ajustar a probabilidade de retransmissão p para optimizar o funcionamento.

3.7.2 Integração de prioridades

Em aplicações industriais normalmente coexistem vários tipos de tráfego, em que a entrega de algumas mensagens assume carácter mais urgente relativamente a outras, pelo que é extremamente importante dispor de um mecanismo que implemente prioridades.

Uma das decisões que é importante para a implementação reside na preempção ou não das mensagens menos prioritárias. Este factor condiciona a performance atingida pelas diferentes classes, pois ao contrário do que acontece na preempção de processos, a mensagem menos prioritária que é interrompida é totalmente perdida, ou seja, o seu tempo de ocupação do canal é desperdiçado.

Outra decisão que é necessário tomar diz respeito a quantos níveis de prioridade uma aplicação exige, traduzindo-se num compromisso entre flexibilidade e *overhead* associado. Normalmente, a existência de dois níveis de prioridade é suficiente.

[Tobagi, 82] apresenta um algoritmo CSMA com prioridades, em que começa por identificar os requisitos que um protocolo com mecanismo de prioridades deve suportar como sendo:

- A performance obtida por uma dado nível de prioridade não pode ser prejudicada pela carga exercida nos níveis prioritários mais baixos.
- Entre mensagens do mesmo nível de prioridade deve haver igualdade de oportunidades (justiça).
- O mecanismo deve ser robusto.
- O excesso de informação *(overhead)* necessário para a sua implementação e o volume de informação de controlo trocado entre nós, deve ser mínimo.

[Tobagi, 82] sustenta ainda o interesse em que este esquema implemente prioridades em termos de mensagens e não de nós; e sistematiza os problemas que surgem na implementação de um mecanismo de prioridades num sistema distribuído:

- Identificar os instantes (que têm que ser conhecidos por todos) de transmissão associados ao local da mensagem mais prioritária.
- Projectar um mecanismo que determine a classe não vazia mais prioritária.

- Projectar uma função que permita o acesso aos vários utilizadores de uma dada classe.

Resumidamente, a sua proposta [Tobagi, 82] consiste na reserva de intervalos de tempo atribuídos às diversas estações, em que a sua prioridade é transmitida. Isto verifica-se após cada transmissão (com ou sem sucesso). A prioridade da estação corresponde à mais alta prioridade das suas mensagens.

[Adelstein, 94] apresenta soluções para estabelecer um mecanismo de prioridades em *ethernet* de modo a poder suportar tráfego multimédia. O protocolo decompõe-se em duas funções distintas:

- Disseminação do estado de cada nó, ou seja, da prioridade mais elevada que a fila de mensagens de cada nó possui. Para este efeito, todos os nós mantêm uma fila com as mais altas prioridades de cada nó.

- Transmissão dos pacotes por ordem de prioridade. Cada nó só transmite se a sua prioridade for a mais elevada. Os empates são resolvidos por uma ordem imposta inicialmente.

Após estar resolvido o primeiro problema, o segundo não é de forma alguma complexo. [Adelstein, 94] defende que esta funcionalidade deve ser implementada ao nível da camada de ligação de dados, ou, idealmente, a nível de *hardware* com o desenvolvimento de controladores mais inteligentes. A justificação consiste no facto de que a implementação de prioridades de outra forma só resultaria localmente, não assegurando a sua transmissão por ordem de prioridades globais, e pelo peso acrescido que incorria a passagem de informação entre camadas e o seu processamento.

Desde logo, a disseminação do estado de cada nó levanta um problema inicial, que é a sua transmissão decorrer concorrentemente com a restante informação que circula. Por outras palavras, estabelecer as condições iniciais do processo.

São apresentados [Adelstein, 94] três métodos que pretendem solucionar os dois subproblemas envolvidos em que se divide o primeiro:

- A transmissão da mais elevada prioridade de cada nó.

- A sinalização de fim de transmissão da mensagem prioritária, que tem que ser adquirida por todos os nós.

Esses três métodos são:

- Método síncrono. Passada a transmissão de um número pré-determinado de pacotes, entra-se num período de transmissão de prioridades, em que cada nó faz um *broadcast* da sua prioridade mais alta de uma forma ordenada previamente. Assim, deixa de existir a possibilidade de colisão durante este período, mas com as desvantagens de perda de eficiência, pois parte da largura de banda é perdida para esta disseminação e implica um acréscimo de processamento significativo a nível das camadas de comunicações de pacotes *broadcast*.

- Método síncrono modificado. Como o próprio nome indica este método consiste numa variante do primeiro, em que o período de transmissão de prioridades decorre recorrendo ao mecanismo tradicional CSMA/CD. Além disso, se um nó não possui mensagens para transmissão, não desperdiça o seu intervalo de tempo como no primeiro caso em que tem que transmitir a sua prioridade mais alta (nula neste caso). No entanto, podem ocorrer colisões e torna-se mais complexo determinar quando terminou este período, o que é conseguido através de um mecanismo de *timeout*.

- Método assíncrono. Não é criado explicitamente um intervalo de tempo para troca de pacotes de prioridades; estes competem com a restante informação pela posse do canal.

3.7.3 Suporte de comunicação tempo-real

Em sistemas tempo-real com restrições temporais críticas (*hard real-time*), é preciso assegurar o tempo-real em todos os componentes do sistema, como, por exemplo, a comunicação em sistemas distribuídos, de modo a garantir *deadlines* com probabilidade unitária. Normalmente, têm associados mecanismos de tolerância a falhas e requisitos elevados de fiabilidade.

Obviamente, o ou os sistemas operativos utilizados também têm que cumprir restrições temporais, nomeadamente no tratamento das mensagens recebidas e enviadas; ou seja, é necessário quantificar e conhecer antecipadamente os tempos máximos a nível do protocolo de comunicações.

Para atingir o suporte de comunicação de tempo-real, existem várias opções dependendo da abordagem seguida. Como já foi referida aquando da discussão acerca dos métodos de acesso, existem três grandes opções:

- ▷ Métodos de acesso controlado.
- ▷ Métodos de acesso aleatório.
- ▷ Métodos de acesso variável.

Esta classificação ainda pode ser mais pormenorizada, como foi descrito anteriormente.

3.7.3.1 Métodos de acesso controlado

Se regularmos o acesso ao meio de forma exclusiva, não se obtêm colisões, pelo que a comunicação é determinística. A atribuição do direito de acesso pode ser efectuada de uma forma pré-determinada, como por exemplo, no caso TDMA. Outra hipótese, é a existência de um mecanismo de passagem de testemunho *(token)* de forma explícita ou implícita, ou da existência de intervalos de tempo em que é arbitrado o acesso ao meio.

3.7.3.1.1 BRAM

O método (BRAM: *Broadcast Recognizing Access Method*) descrito em [Chlamtac, 79] previne colisões, é justo para todas as estações e é descentralizado. Trata-se de um melhoramento face ao protocolo *basic bit-map method* referido em [Tanenbaum, 88].

Neste método existe um curto intervalo de tempo atribuído a cada nó em que assinala a sua intenção de transmissão. A transmissão processa-se depois por ordem, ou por outras palavras, por transmissão de testemunho implícita.

No algoritmo BRAM cada estação transmite logo a seguir a ter assinalado a sua intenção de transmitir no intervalo atribuído. Assim, o tempo de espera vem reduzido apesar de a eficiência ser a mesma. Propõe ainda duas variantes que não evitam colisões ainda que a sua probabilidade de ocorrência seja reduzida.

3.7.3.1.2 MSAP

Em [Kleinrock, 80] é apresentada uma proposta semelhante (MSAP*: Mini Slotted Alternating Priorities*) à anterior que não permite colisões. Uma das grandes vantagens face ao protocolo

CSMA, reside no facto de a sua performance não se degradar significativamente em condições de muita utilização.

3.7.3.1.3 Tempra

Esta solução descrita em [Pritty, 95] recorre a uma estação monitora, que transmite um impulso periódico para sincronização de todos os nós. Contabilizando um intervalo de tempo diferente a partir do momento em que recebe o impulso, não esquecendo o intervalo de propagação, cada estação consegue aceder ao meio de forma exclusiva. Este método cria assim uma prioridade implícita que é resolvida, por exemplo, com a restrição de uma só transmissão enquanto não for dada oportunidade às outras estações.

Está ainda prevista a existência de duas classes de tráfego, que são servidas por filas distintas.

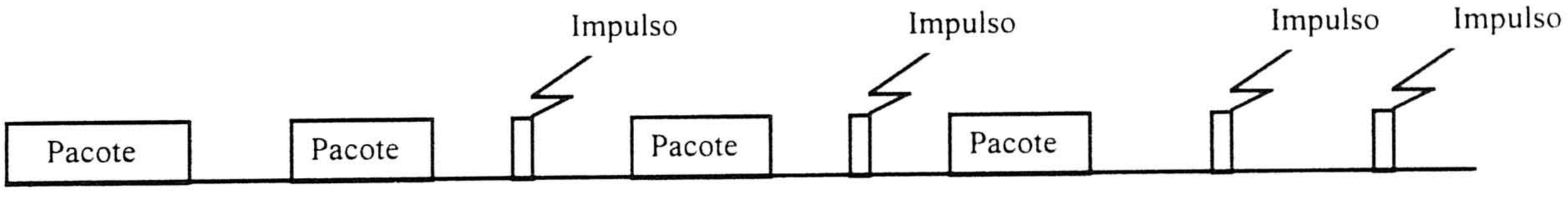


Fig. 3.2 - Tempra

3.7.3.2 Métodos de acesso aleatório

Esta classe de métodos de acesso não efectua nenhum género de sincronização ou de coordenação entre as estações, pelo que a existência de conflitos, sob a forma de colisões, é inevitável. Então, torna-se necessário a resolução destes conflitos em tempo limitado para atingir o tempo-real. Reportando à classificação realizada anteriormente, existem duas opções: partição no tempo e partição por endereços.

De referir que pode não ser correcto considerar estas propostas como determinísticas, pois o seu tempo de serviço não é conhecido com exactidão; no entanto, o seu tempo máximo é limitado, ou seja, trata-se de um serviço de tempo-real.

3.7.3.2.1 Partição no tempo

Nesta subclasse encontram-se essencialmente duas variantes: os protocolos Window CSMA e Virtual-Time CSMA.

A primeira opção consiste na definição de janelas temporais que vão sendo subdivididas sucessivamente e em que o acesso a cada uma dessas janelas vai sendo restringido até à resolução do conflito. Desta forma, é atingido um tempo máximo de acesso limitado.

3.7.3.2.1.1 Virtual-Time CSMA

A segunda classe de métodos de acesso encontra-se sistematizada em [Zhao, 87]. Este trabalho analisa o protocolo VTCSMA, que consegue garantir *deadlines* para a comunicação, sendo por isso adequado para sistemas de tempo-real *hard*. Esta classe de protocolos foi inicialmente desenvolvida por Molle.

Cada nó possui dois relógios, denominados real e virtual, que funcionam a velocidades diferentes, sendo o virtual mais rápido. Quando um nó encontra o canal livre, coloca a zero o relógio virtual e arranca-o. O nó transmite quando o relógio virtual atinge um parâmetro relativo à mensagem. Dependendo deste parâmetro obtêm-se diferentes estratégias de transmissão:

VTCSMA-A	tempo de chegada da mensagem	*first come - first served*
VTCSMA-T	tempo de transmissão da mensagem	*minimum message - length first*
VTCSMA-L	último tempo de envio da mensagem	*minimum laxity first*
VTCSMA-D	*deadline* da mensagem	*minimum deadline first*

Destas estratégias [Zhao, 87] prova que a VTCSMA-D tem o menor número de mensagens perdidas, e a VTCSMA-L alcança a maior utilização do canal, quando comparadas com as outras. Todos estes protocolos se mostram insensíveis ao número de nós do sistema, para um dado nível de carga, relativamente à utilização do canal.

Apesar de este protocolo não exigir a perfeita sincronização de todos os relógios reais, as diferenças implicam que a estratégia assumida pode não ser cumprida. Para estabelecer um termo de comparação e verificação da sua superioridade relativamente à classe de protocolos CSMA/CD podem consultar-se [Beuerman, 88] e [Armyros, 92]. O primeiro estudo sugere uma correspondência entre uma política de *first come-first served* e a classe de protocolos VT-CSMA/CD, e entre uma política de *random service order* e os algoritmos CSMA/CD.

3.7.3.2.2 Partição por endereços

3.7.3.2.2.1 CSMA-DCR

Esta proposta desenvolvida pelo instituto INRIA, na qual o acrónimo DCR significa *Deterministic Collision Resolution*, como o próprio nome indica assegura determinismo na comunicação utilizando um mecanismo derivado do algoritmo CSMA/CD.

Este protocolo é compatível com o *standard* IEEE 802.3 a nível da camada física e da subcamada LLC, podendo coexistir com estações que usem o algoritmo BEB da camada MAC, não assegurando neste caso, no entanto, um tempo máximo de transmissão.

O protocolo é idêntico ao CSMA/CD na ausência de colisões. Quando ocorre uma colisão o protocolo altera-se, iniciando-se um intervalo de tempo denominado época. Existem dois modos de operação distintos durante uma época: geral e periódico.

No modo geral, o período de contenção provocado pela colisão é resolvido num tempo máximo recorrendo a uma árvore binária previamente estabelecida através de algarismos atribuídos a cada estação. Concretizando, o grupo de estações autorizadas a transmitir é sucessivamente dividido por dois, aquando da ocorrência de cada colisão. A pesquisa binária da árvore acaba quando existe uma transmissão com sucesso, ou quando decorre um intervalo de tempo suficiente sem transmissão, chamado *idle slot time*, que depende obviamente do tempo máximo de propagação do meio. Só há a garantia de transmissão das mensagens envolvidas na colisão durante uma época, pelo que as estações que pretendem transmitir durante esse intervalo de tempo, podem ter que esperar pelo fim deste, sendo esta opção configurável (*blocked-entry* ou *free-entry*).

O modo periódico comporta-se como um algoritmo TDMA puro, sendo a época dividida num número de intervalos equivalente ao número de estações.

Verifica-se facilmente que, sob carga elevada, o modo geral é inferior, especialmente para pacotes de dimensão reduzida.

3.7.3.2.2.2 CSMA/PDCR

Trata-se de um método semelhante ao anterior, mas com a introdução de intervalos de tempo (*slots*) após a ocorrência de uma transmissão com sucesso, em que o acesso é estruturado em níveis de prioridade. Assim, é arbitrado o direito de acesso de uma classe de prioridades para a

próxima transmissão. Se ocorrer uma colisão é porque se verificou um conflito entre mensagens do mesmo nível prioritário, ou um fenómeno de preempção por parte de classes mais prioritárias, que por sua vez também pode gerar uma colisão. Deste modo, consegue-se a garantia que a transmissão efectuada é a mais prioritária, em termos de mensagens e não de estações, ao contrário do método anterior em que existe uma prioridade implícita em termos de estações, que advém da organização em árvore binária [Turiel, 96].

Este método alia a resolução de colisões, dentro da mesma classe de prioridades, por partição por endereços, com o acesso controlado por nível de prioridade.

3.7.3.3 Métodos de acesso variável

Tal como a proposta imediatamente anterior, que se trata de uma variante do acesso aleatório, com resolução de colisões por endereços, existem outras propostas que não se enquadram na classificação adoptada; isto deve-se ao facto do acesso ser efectuado de forma aleatória e de forma controlada, dependendo da situação.

3.7.3.3.1 PCSMA

[Yavatkar, 92] apresenta uma proposta para estender o protocolo CSMA/CD para atingir o suporte de mensagens tempo-real, além do restante tráfego. A envolvente sobre a qual se debruça este estudo são as redes presentes num sistema de manufactura.

As fontes de mensagens prioritárias são consideradas periódicas e é realizada uma reserva de largura de banda prévia para suporte destas. As restantes fontes utilizam o protocolo sem modificações e em caso de colisão entre estas e as fontes periódicas, as últimas não efectuam o *backoff*. Os pacotes possuem bits suficientes de *overhead*, de forma às fontes não periódicas detectarem a colisão e pararem de transmitir antes do envio de data útil.

O protocolo garante o cumprimento das *deadlines* das mensagens periódicas, desde que a utilização total deste tipo de mensagens não supere os 100%. A sua implementação é perfeitamente distribuída e não implica uma sincronização estrita dos relógios das fontes periódicas, mas estes não devem estar separados mais de 100 microsegundos.

3.7.3.3.2 RETHER

[Venkatramani, 95] propõe um protocolo (RETHER) realizado em *software* para atingir uma resposta em tempo-real sobre *ethernet*. Identifica os problemas a resolver para uma correcta transmissão de dados multimédia, concretamente o não determinismo e a injustiça implícita do mecanismo de acesso (dependendo da sua localização alguns nós são privilegiados).

A rede opera em dois modos distintos, o modo normal e um modo apelidado de *timed token-bus*, em que o tempo é dividido em *slots* e a transmissão com restrições tempo-real é assumida como periódica. Assim, consegue-se uma degradação de performance mínima e não implica alterações em aplicações já existentes.

A sua implementação é realizada ao nível do *device driver* no sistema Unix, ou seja, da camada de ligação de dados do modelo OSI. Permite aceder directamente a esta camada, não passando pelas camadas TCP/IP, por exemplo, o que se revela importante também em termos de performance.

Quando algum nó tem alguma mensagem tempo-real para transmissão, efectua um *broadcast* para mudança para modo RETHER, ao que todos os outros nós devem responder com uma mensagem de *acknowledge*. Esta resposta serve também para assegurar que todos os nós não têm pacotes pendentes para retransmissão, pois torna-se complexo atingir este objectivo acedendo ao controlador de rede. No entanto, como esta mensagem compete com as outras mensagens, pode haver um atraso que é não limitado temporalmente.

3.8 Conclusões

A descrição acerca de métodos de acesso e, principalmente, dos estudos efectuados com o objectivo de ultrapassar o caracter aleatório do mecanismo de acesso da rede *ethernet*, serve também para reafirmar a importância desta opção na integração dos sistemas de fabrico.

As propostas de alteração assumem características diferentes consoante os objectivos subjacentes. Trata-se, obviamente, de soluções proprietárias, cujo campo de actuação se resume às aplicações cujas exigências de comunicação não se coadunam com a rede *ethernet*, concretamente em termos do tempo de resposta.

A necessidade de um elemento integrador nos sistemas de fabrico, ou do aproveitamento de redes já existentes, impulsionou a investigação nesta área. Não se pode esquecer o papel do custo

desta solução, mas este é evidentemente agravado pelos custos de desenvolvimento. Por outro lado, estes custos são amortizados no custo da integração com os outros níveis presentes num sistema de fabrico.

As alternativas de melhoria de desempenho e de suporte de prioridades, não garantem o tempo-real, pelo que vêm o seu campo de aplicação restringido.

A avaliação destas propostas tem que obedecer a um conjunto de critérios que interessa estabelecer. As suas vantagens competitivas dependem, posteriormente a esta análise, em grande parte da aplicação.

Evidentemente, estes métodos traduzem-se, regra geral, numa perda de eficiência, em termos de capacidade efectiva do meio de transmissão, ou de um esforço computacional suplementar. A importância relativa destes elementos depende de um conjunto alargado de factores, nomeadamente a plataforma de *hardware* e o sistema operativo podem ser decisivas.

A necessidade de desenvolvimento de *hardware* também pode ser um factor determinante. É de notar, que devido ao facto do método de acesso ser implementado em *firmware*, de modo a minimizar custos e tempos de serviço, muitas das propostas só são exequíveis com alterações significativas no *hardware*. Por outro lado, estas alterações são muito dependentes do *hardware* específico, concretamente do controlador de rede.

A complexidade da solução irá condicionar o custo de desenvolvimento, e o desempenho final.

Outro aspecto muito importante, que não mereceu muita atenção nestes estudos, pois é extremamente complexo e depende da implementação, é a tolerância a falhas. Em aplicações críticas este critério assume uma importância acrescida. Aspectos relacionados, por exemplo, com a falha de uma estação, considerando inicialmente falhas silenciosas, têm que ser previstos, o que se traduz em complexidade adicional. O facto do tipo de controlo ser centralizado ou distribuído, revela-se muito significativo neste capítulo.

Por outro lado, outro critério que está relacionado com o anterior diz respeito à robustez do método implementado. A necessidade de sincronização dos relógios, por exemplo, com desvios ínfimos não é fácil de atingir, pois é preciso contabilizar os atrasos de propagação do meio e da repectiva interface.

A discussão de algumas propostas de alteração mencionadas será realizada com mais pormenor posteriormente.

Capítulo 4

Testes experimentais sobre *ethernet*

4.1 Introdução

A evolução constante do *hardware* tem impulsionado, e, ao mesmo tempo, sido impulsionada pelo desenvolvimento de aplicações cada vez mais complexas. O desempenho destas aplicações está condicionado por um grande número de factores que não só o *hardware*, nomeadamente, o *software* de suporte, ou seja, o sistema operativo. No caso das aplicações distribuídas acrescenta-se mais uma condicionante: o sistema de comunicação. Por sua vez, o desempenho deste sistema depende das características da sua arquitectura. Uma dessas características muito significativa, o mecanismo de acesso ao meio, já foi extensamente abordada no capítulo dois.

As propostas de modificação da especificação da rede *ethernet*, direccionadas para as aplicações fabris, têm como objectivo garantir o determinismo da comunicação, que surge sempre como requisito fundamental deste tipo de aplicações. Nos casos em que isto não acontece será sensato utilizar a *ethernet*? Para uma aplicação concreta, será possível garantir com probabilidade elevada que a comunicação se processa em tempo inferior a um dado valor? Obviamente, estas questões só se levantam para sistemas de tempo-real não crítico e *best-effort*.

Neste sentido, realizaram-se alguns testes experimentais muito simples e condicionados pela disponibilidade de material. Verifica-se que, dada a forma eminentemente prática como foram colocadas estas questões, não seria possível atingir os objectivos pretendidos com outra aproximação. Concretamente, de referir a simulação e os estudos analíticos. A desvantagem

desta abordagem está relacionada com a dependência das condições de teste, pelo que a extrapolação das conclusões obtidas tem que ser realizada com precaução.

Não se pretendeu realizar testes intensivos e extensos de modo a justificar a utilização da rede *ethernet* numa base estatística.

4.2 Contexto actual

Sobre o método de acesso ao meio físico da rede *ethernet* têm recaído as responsabilidades pelo inferior desempenho de algumas aplicações, concretamente aplicações gráficas e multimédia. No entanto, os problemas já enunciados, como, por exemplo, o efeito de captura, registam-se em contextos muito exigentes, com estações com elevados níveis de desempenho, muitos utilizadores e tráfego não restrito a um dado domínio.

Nos sistemas de fabrico, o contexto assume contornos diferentes, que já foram identificados. Contudo, a tendência de crescimento das exigências das aplicações para com o sistema de comunicação é notória. Devido à grande diversidade de aplicações, e respectivas implementações, não se podem tipificar facilmente plataformas que suportem as aplicações fabris.

No entanto, nos sistemas de monitorização e controlo que constituem o foco deste trabalho, encontram-se plataformas com menor poder de processamento como, por exemplo, PLCs. Tem-se assistido a uma evolução no sentido das plataformas PCs neste campo, impulsionada pelo menor custo, maior facilidade de utilização e maior grau de abertura.

Considerando esta envolvente, ou seja, as aplicações de monitorização e controlo menos complexas, é importante ter a percepção da ordem de grandeza dos valores temporais que coexistem numa aplicação. Por outras palavras, tentar identificar se o sistema de comunicação, baseado em *ethernet* constitui o estrangulamento, considerando todos os outros aspectos que estão envolvidos.

4.3 Abordagem experimental

A opção pela realização de testes experimentais, face às alternativas de estudo analítico ou simulação, deveu-se aos seguintes factores:

- ▷ Consideração das características dos nós, nomeadamente sistema operativo e protocolo de comunicação.
- ▷ Verificação do real funcionamento de todo o sistema de comunicação e da sua robustez, mesmo quando sujeito a condições exigentes.
- ▷ Contextualização do uso da rede *ethernet*, com plataformas de baixo custo.
- ▷ Simulação de uma situação próxima de uma aplicação concreta, que será descrita posteriormente.

As desvantagens desta abordagem, no caso presente, residem nos seguintes factos:

- ▷ Está sujeita a erros experimentais e falhas de *hardware* e *software*.
- ▷ Envolve mais recursos.
- ▷ Não permite a introdução de uma factor de escala na variável tempo.
- ▷ Possibilita menor controlo de todos os factores que podem influenciar os resultados.
- ▷ Torna mais difícil a alteração das condições de teste.

4.4 TCP/IP

O protocolo de comunicações utilizado foi o TCP/IP que, conjuntamente com a *ethernet*, surge como alternativa válida de modo a conseguir atingir a integração dos sistemas pretendida.

O TCP/IP consiste num conjunto de protocolos que regulamentam a comunicação na *worldwide internet* (fig 4.1).

Devido à sua não correspondência unívoca relativamente às camadas preconizadas pelo modelo OSI, torna-se delicado situar ou mapear as funções realizadas no âmbito do TCP/IP neste modelo. No entanto, pode afirmar-se que este conjunto de protocolos define as funcionalidades atribuídas às camadas de rede e transporte do modelo OSI.

Apesar deste protocolo nunca ter sido objecto de normalização, a sua vasta utilização confere-lhe o estatuto de "*standard de facto*". Esta situação é atestada pela recomendação do

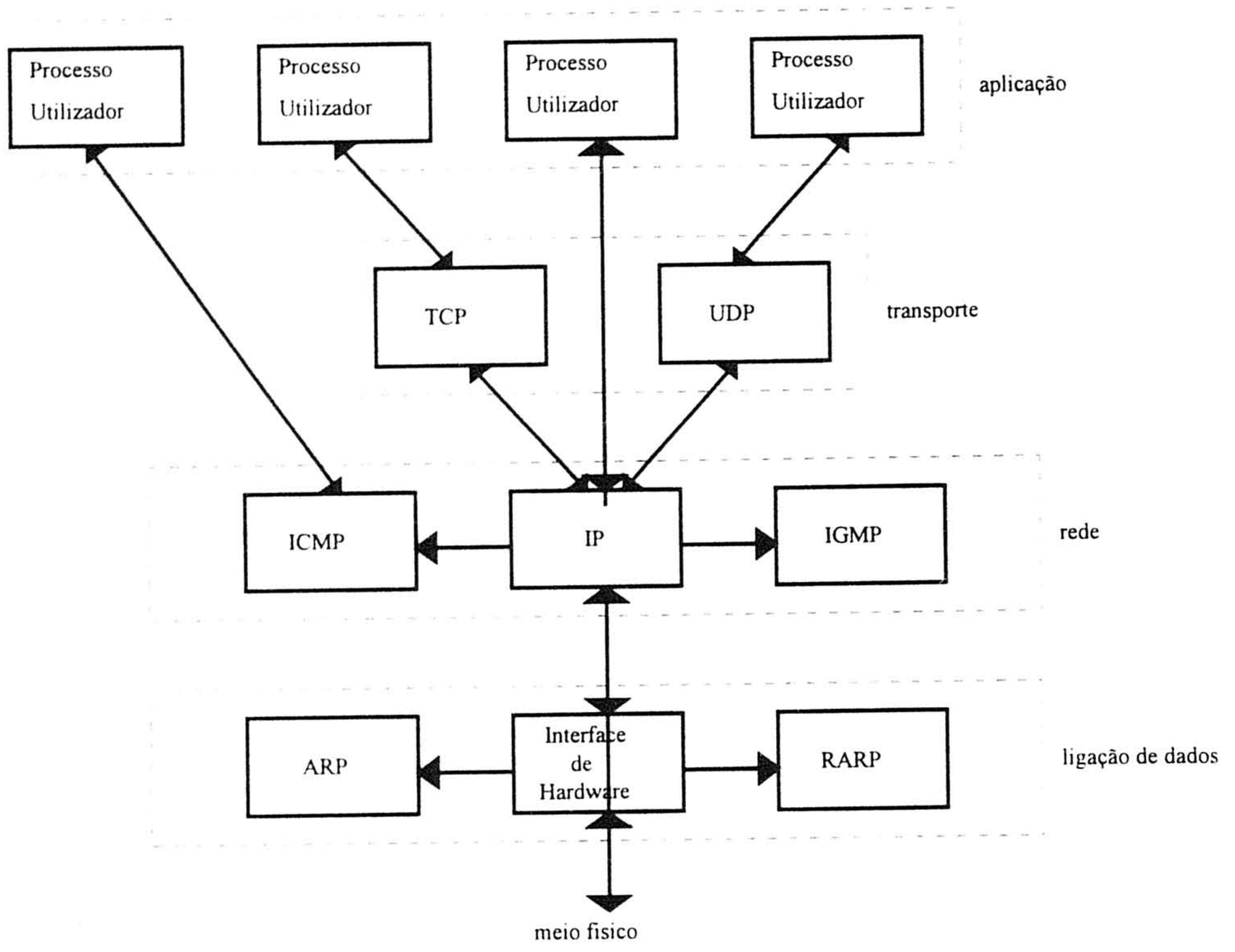


Fig. 4.1 - TCP/IP

GOSIP (*Government OSI Profile*), organismo gerido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*), no sentido da utilização do TCP/IP, para a aquisição de equipamentos e *software*.

O controlo e aprovação de novas normas são efectuados por quatro organismos [Stevens, 94]:

- Internet Society (ISOC).
- Internet Architecture Board (IAB).
- Internet Engineering Task Force (IETF).
- Internet Research Task Force (IRTF).

A utilização do TCP/IP como meio de comunicação globalizante, e como elemento integrador em aplicações de escritório, não oferece contestação. A sua utilização a nível de integração industrial também tem evoluído favoravelmente.

4.4.1 Aplicações fabris

No entanto, pode questionar-se a utilização do TCP/IP em aplicações fabris, dada a carga computacional que todas as suas funcionalidades exigem, agravado pelo facto de algumas não serem facilmente justificáveis para aplicações deste tipo. Como exemplo que corrobora esta última afirmação, pode referir-se que o número de nós e a aplicação podem não justificar mais do que um segmento de rede. Neste caso, todo o suporte de *gateways* e *routers* não faz sentido. Outro exemplo é o campo de *checksum* que, dada a taxa de erros de transmissão, pode ser considerado desnecessário [Cabrera, 88], visto existir o mesmo mecanismo de controlo de erros no pacote *ethernet*.

No entanto, não se deve esquecer o crescimento acelerado do desempenho computacional e a redução substancial do preço dos componentes associados, nomeadamente memória, pelo que as desvantagens referidas são suplantadas pelas propriedades de expansibilidade e abertura que esta solução possui.

Exemplos desta tendência são o projecto EPICS já referido, em conjugação com a *ethernet*, e o MiTS *(Maritime IT Standard)*.

O MiTS [MiTS, 94] consiste num conjunto de normas e ferramentas, cujos objectivos são integrar equipamentos de diferentes vendedores e suportar vários tipos de rede. Esta proposta está vocacionada para sistemas de controlo e supervisão em navios. Concretamente, pretende definir um conjunto de serviços independente da tecnologia para a que foi denominada rede de sistema. Esta rede faz parte de uma arquitectura de três camadas: rede administrativa, rede de sistema e rede de instrumentação. Esta estrutura é idêntica à que foi apresentada no capítulo dois. Assim, os seus requisitos e funcionalidades são idênticos aos da rede intracelular, objecto do nosso estudo.

4.4.2 Caracterização

A explicação acerca da rápida expansão e aceitação generalizada advém das suas características:

- ▷ Abertura. Trata-se, verdadeiramente, de um sistema aberto, pois todas as especificações são do domínio público.

- ▷ Extensa documentação. Existe um conjunto vasto de RFCs (*Request for Comments*) que abordam todos os aspectos relacionados com o TCP/IP, desde

requisitos, expansões e aplicações. Este documentos, disponíveis em muitas instituições, servem de base à discussão, também pública, acerca da evolução do TCP/IP. Além disso, recentemente, têm sido publicados alguns livros ([Stevens, 94] e [Stevens, 95], por exemplo) que pretendem descrever de forma mais acessível todos os conceitos associados.

- Independência da tecnologia. As camadas hierarquicamente inferiores não se encontram definidas, pelo que não existem quaisquer limitações a nível de *hardware*, sendo utilizado em LANs, WANs e ligações série (SLIP).

- Disponibilidade. A generalidade dos sistemas operativos suporta de raiz o TCP/IP ou disponibiliza-o a baixo custo.

- Aplicações já definidas. Existe um conjunto de aplicações muito úteis já integradas como, por exemplo, o `telnet`, o `ftp` e o `e-mail`. Por outro lado, apesar de não haver qualquer especificação acerca das camadas superiores, existem propostas que se encontram generalizadas, cujo exemplo mais representativo é o `socket`.

- Interligação universal. A organização dos equipamentos através de endereços únicos permite estabelecer a comunicação sem barreiras geográficas.

- Fiabilidade. Devido à sua ampla utilização, abrangendo as mais variadas aplicações e configurações, este conjunto de protocolos está plenamente testado e os problemas identificados e corrigidos, na sua maior parte.

- Evolução contínua. O TCP/IP é objecto de investigação por muitas instituições, nomeadamente universidades, de modo a adaptar-se aos novos desafios que vão surgindo a nível de requisitos, concretamente, para fazer face à evolução acelerada do *hardware*.

4.4.3 Camada IP

A camada IP fornece um serviço do tipo datagrama, ou seja, sem conexão *(connectionless)*. Este serviço, orientado ao pacote, não é confirmado pelo que não é fiável. Os mecanismos que permitam implementar outro tipo de serviço são responsabilidade da camada TCP (camada de transporte), ao contrário do modelo proposto pela ISO, no qual esta distinção é realizada na

camada dois - *Data Link Control*. Esta camada, normalizada nas normas IEEE 802, inclui, na norma 802.2 que regulamenta a subcamada LLC, a definição de três tipos de serviços:

- *Connectionless*..
- *Connection-oriented*.
- *Acknowledge connectionless*.

4.4.4 Protocolos TCP e UDP

No contexto do TCP/IP, os dois primeiros serviços são disponibilizados às camadas superiores, recorrendo à abstracção de *port*, pelos seguintes protocolos:

- UDP *User Datagram Protocol*. Implementa um serviço *connectionless*, sem confirmação e não fiável. Não garante a ordem dos pacotes recebidos, nem qualquer forma de controlo de fluxo. Assim, não existem mecanismos que permitam lidar com as ocorrências de pacotes perdidos, duplicados ou fora de ordem, nem com a possibilidade de um dos intervenientes na comunicação não conseguir suportar uma dada taxa de transmissão.
- TCP *Transmission Control Protocol*. Disponibiliza um serviço *connection-oriented* completamente fiável, pois contém mecanismos que permitem ultrapassar os problemas de comunicação já mencionados. Especificando, realiza controlo de fluxo, e garante a ordem dos pacotes e a detecção de pacotes perdidos ou duplicados. A comunicação é composta por três fases distintas: estabelecimento da conexão, troca de informação e fecho da conexão.

A grande vantagem do protocolo UDP reside na sua simplicidade, o que se traduz numa carga computacional menor. Terá sido esta vantagem que levou à sua escolha para suporte do protocolo NFS (*Network File System*) por parte da SUN. Por outro lado, permite maior liberdade aos mecanismos a implementar nas camadas superiores, o que pode constituir uma vantagem.

Se os argumentos de que a taxa de erros é extremamente reduzida, as perdas ou duplicações de pacotes são raras, e a ordem dos pacotes é mantida na maioria dos casos, nomeadamente a nível de LANs, não são suficientes para uma determinada aplicação, então a solução é utilizar o TCP. Principalmente nos casos em que a carga computacional não se revela restritiva, esta solução é muito eficaz.

Para atingir os objectivos enunciados em termos de fiabilidade o TCP efectua o seguinte [Stevens, 94]:

- ▷ Segmentação dos pacotes enviados pelo nível de aplicação.
- ▷ Contabilização de um tempo máximo para recepção do *acknowledge* e retransmissão se necessário.
- ▷ Envio de *acknowledge*.
- ▷ Cálculo de *checksum* próprio.
- ▷ Verificação da ordem e duplicação dos pacotes recebidos pela camada IP.
- ▷ Transmissão do espaço de *buffer* livre de modo a assegurar o controlo de fluxo.

4.4.5 Desempenho do TCP/IP

O tamanho dos *buffers* de transmissão e recepção (normalmente denominado *window*) pode ser alterado de modo a maximizar o desempenho.

A respeito do tamanho dos pacotes, é normalmente assumido que quanto maior o seu tamanho melhor o desempenho. Isto deriva do facto de minimizar os custos em termos de rede (menor *overhead*), *routers* (menos decisões), e estações (processamento associado ao protocolo e ao atendimento de interrupções) [Stevens, 94]. No entanto, o mesmo autor refere um exemplo, na qual as vantagens ao nível do *router* podem sofrer contestação.

A performance do TCP/IP sobre *ethernet* a 10 Mbps, ou seja, a taxa máxima de dados do utilizador, não contabilizando o *overhead* do protocolo, encontra-se calculada em [Stevens, 94] e corresponde a cerca de 1,2 Mbps. Isto resulta do encapsulamento descrito na figra 4.2.

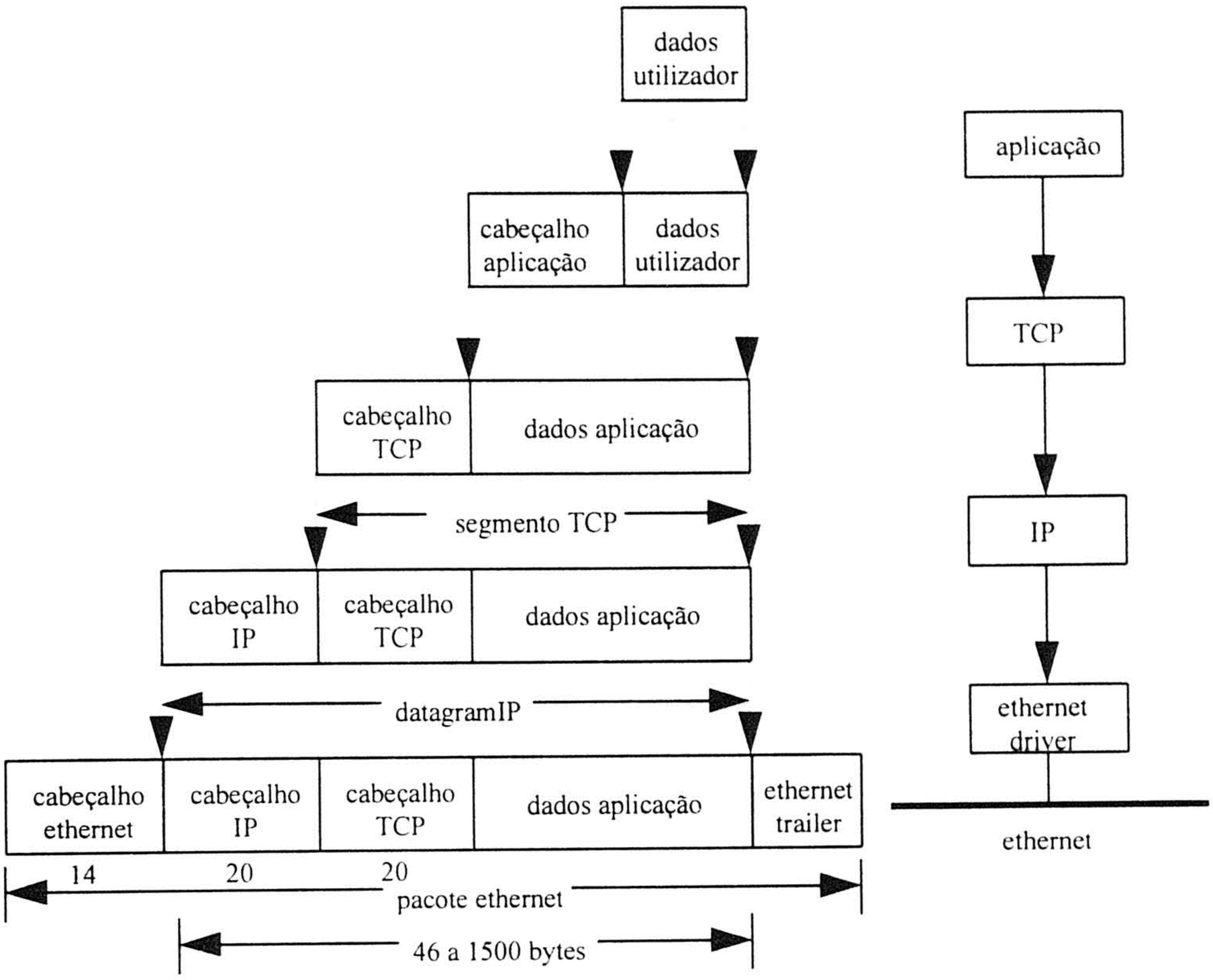


Fig. 4.2 - Encapsulamento

A maximização da performance do TCP/IP tem sido alvo de vários estudos, também com o objectivo de conseguir a adaptação ao contexto sempre em mudança. Neste âmbito, assiste-se ao desenvolvimento actual do IPng ou IPv6, que visa responder aos desafios impostos pela rede global (por exemplo, a capacidade máxima de endereçamento), pelo que se traduz numa evolução pouco vocacionada para a envolvente desta dissertação.

Não existem muitos valores experimentais a respeito do desempenho do TCP/IP, mas a taxa de 8 Mbps referida em [Jacobson, 88a], sobre *ethernet*, quando utilizada a totalidade da largura de banda (10 Mbps), surge como o limite máximo alguma vez atingido. Este valor foi atingido entre *workstations* SUN 3/50, em que o estrangulamento se verificou ao nível do controlador de rede. O protocolo sob o qual foram realizados os testes, empregava um novo algoritmo denominado *header prediction,* que consiste, muito resumidamente, no aproveitamento do conhecimento antecipado dos pacotes, se estes fizerem parte de uma transferência que envolve uma grande quantidade de informação.

Um estudo que tinha como objectivo a avaliação do desempenho entre processos do utilizador, quantificando os vários factores envolvidos, encontra-se descrito em [Cabrera, 88]. No âmbito deste trabalho, foram realizados vários testes experimentais que pretenderam comparar as opções

TCP e UDP, que por sua vez permitiram identificar a influência das camadas de *software* no desempenho global das aplicações distribuídas. As cargas de processamento computacional e da rede foram artificialmente variadas, e registados os valores de desempenho para tamanhos de pacotes diferentes, em redes *ethernet* a 3 e 10 Mbps, e com três plataformas de *hardware* diferentes: VAX-780, VAX-750 e SUN II.

Alguns dos resultados obtidos demonstram que existem vários factores condicionantes do desempenho global, que não são muito perceptíveis numa primeira aproximação. Por exemplo, o facto de os pacotes de 1024 bytes obterem melhores resultados com o protocolo TCP. Isto deve-se ao facto da versão do sistema operativo utilizado (4.2 BSD), usar *buffers* (*mbufs*) de 1024 bytes para armazenar os dados que são recebidos e transmitidos pela interface de rede, ou *buffers* de 128 bytes, caso o tamanho total seja inferior a 1024 bytes. Devido a este modo de implementação registou-se [Cabrera, 88] que um pacote de 1024 bytes demora apenas o dobro do tempo que um pacote de 128 bytes e o mesmo tempo que um pacote de 512 bytes. A diferença mais significativa ocorre para mensagens de 1023 bytes que vêm os seus tempos penalizados em 60%.

Surpreendente foi o facto do melhor desempenho se ter verificado com a rede *ethernet* mais lenta. Isto foi justificado pela interface de *hardware* mais rápida, no caso da rede a 3 Mbps, e só foi possível pelo facto de não se ter atingido taxas de transmissão superiores a 3 Mbps.

Por outro lado, exceptuando o caso dos pacotes de 1024 bytes, o desempenho do protocolo TCP, ao contrário do protocolo UDP, sofreu ligeiras alterações com a variação do tamanho dos pacotes. Este facto foi atribuído à carga computacional a nível do processador.

O valor máximo de taxa de transferência obtido para a rede a 10 Mbps, numa única ligação, foi de 800 kbits/segundo, sobre UDP com pacotes de tamanho máximo sem segmentação (1460 bytes).

Quando se aumentou a carga computacional, os valores obtidos deixaram de ser tão sensíveis ao tamanho das mensagens. Com a rede com uma utilização de 2,2 Mbps, e com as estações sem outro tipo de processamento, registou-se uma quebra de 40% face à situação em que a rede só suportava o tráfego entre as duas estações.

4.5 Condições de teste

Foram utilizados três PCs 486DX2 a 66MHz, com 256 kbytes de memória cache, conjuntamente com uma *workstation* Next Cube. A *workstation* desempenhou, meramente, o papel de meio auxiliar, já que o nosso foco de atenção eram os PCs, equipados com placas de rede ISA perfeitamente genéricas. A configuração destas encontra-se descrita na tabela da figura 4.3.

Nome	Memória	Carta de rede
perestrelo	16 Mbytes	D-Link
brasil	20 Mbytes	SMC-Ultra
india	12 Mbytes	SMC-Ultra

Fig. 4.3 - Configuração dos PCs

4.5.1 Sistema operativo

A escolha ao nível do sistema operativo recaiu sobre o Linux versão 2.0.6, pelas seguintes razões:

- ▷ Sistema aberto.
- ▷ Todo o código disponível.
- ▷ Plataforma PC.
- ▷ Sistema Operativo multitarefa e multiutilizador.
- ▷ Unix *like*.
- ▷ Ampla utilização.
- ▷ Constante evolução.
- ▷ Estrutura modular.

- ▷ Documentação orientada para o desenvolvimento.
- ▷ Vasto conjunto de aplicações.

A principal desvantagem da sua utilização no âmbito pretendido consiste em não suportar exigências tempo-real; mas as suas vantagens como plataforma de desenvolvimento e o facto do foco da análise incidir sobre os sistemas de controlo tempo-real não crítico, suplantaram esta desvantagem.

4.5.2 Método de teste

Os testes foram realizados recorrendo à aplicação `ping`, que utiliza o protocolo ICMP (*Internet Control Message Protocol*), pelas seguintes razões:

- ▷ Evita o desenvolvimento e possui uma panóplia de opções cujo funcionamento está plenamente testado. Concretamente a opção de `flood` revela-se muito útil na realização de testes de desempenho.
- ▷ Permite estabelecer comparações com outros estudos que venham a ser realizados sobre outras plataformas, já que é uma aplicação presente em todas as implementações do TCP/IP.
- ▷ Não necessita de sincronização de relógios entre os vários nós. Outra hipótese seria recorrer a outro relógio, mas tornava mais complexa a tarefa de obter os tempos individuais de transmissão de cada pacote.
- ▷ Usa um protocolo mais simples que o TCP, minimizando o tempo de processamento, o que se revelou importante. No entanto, tal como o TCP, utiliza igualmente um *checksum* a nível do protocolo, além do *checksum* a nível de *hardware*.
- ▷ Funciona como um serviço confirmado, que é normalmente utilizado em aplicações fabris.
- ▷ Corrige assimetrias entre o emissor e o receptor, referidas em [Cabrera, 88], já que ambos têm que efectuar uma recepção e uma transmissão. Apesar do processo no receptor ser executado ao nível do núcleo e do emissor ser executado como processo de utilizador. No entanto, este facto é susceptível de ser encarado como

desvantagem, já que se perde alguma resolução devido ao aumento do número de parcelas.

A não inclusão da camada de transporte, concretamente do TCP, resulta do facto de ser complexo avaliar as implicações nos resultados dos seus mecanismos de controlo de fluxo e de retransmissões. A metodologia seguida (recurso à aplicação `ping`) assegura de forma simplificada algumas das tarefas executadas pelo TCP, nomeadamente a detecção de pacotes perdidos (sem retransmissão) e o controlo de fluxo, visto o envio de novo pacote estar condicionado pela chegada do anterior.

Dada a dificuldade em atingir larguras de banda elevadas com este método, particularmente evidente para os pacotes de dimensão reduzida, houve alguns testes que recorreram a outra aplicação muito simples, descrita posteriormente.

Os resultados apresentam uma resolução de 100 microsegundos. Foram sempre realizados três testes do mesmo tipo com durações distintas, mas de modo a que cada teste implicasse um número de pacotes superior a 40000. Este número é apontado como mínimo em [Cabrera, 88] para a realização de testes similares aos apresentados na primeira parte. Houve sempre pelo menos um teste que envolveu um número de pacotes superior a 100000 pacotes.

Obviamente, que os números atingidos nos testes em que existem fontes de baixa cadência são menores. No entanto, foram sempre superiores a 10000.

A descrição da segunda parte dos testes limita-se a apresentar os valores obtidos mais relevantes pois a dispersão dos resultados não permite a sua compilação em gráficos.

4.5.2.1 Opção `flood`

Trata-se de um modo de operação da aplicação `ping` muito útil para a realização de testes exigentes relativamente a todos os elementos constituintes do sistema de comunicação.

Esta opção concretiza o envio de um pacote assim que a resposta do anterior seja recebida. No caso de existirem erros, ou seja, no caso em que uma resposta não é recebida por qualquer motivo, outro pacote é enviado com uma periodicidade de 10 milisegundos, o que serve para manter a pressão necessária no sentido de revelar anomalias.

Este aspecto é importante no contexto de não possibilitar a ocorrência de colisões, pois, se existirem tempos totais superiores a este valor, a transmissão de novo pacote pode originar uma

colisão. De qualquer forma, é preciso um método para assegurar a continuidade da transmissão, pelo que este valor teria que ser alterado nos casos em que se tornava demasiado exigente para o tráfego vigente. A expressão demasiado pretende ilustrar uma situação em que o tempo do serviço `ping`, em termos médios ou muito expressivos, excede frequentemente o valor de 10 milisegundos. Como esta situação nunca se verificou, a alteração só foi efectuada em casos que era importante assegurar a não ocorrência de colisões, pois nos outros casos era útil manter taxas de utilização elevadas.

4.5.3 Rede

Em todos os testes foi utilizada uma rede isolada, de forma a ser possível contabilizar com maior exactidão os tempos obtidos. Dado o conjunto vasto de factores que podem influenciar o comportamento da rede *ethernet*, decidiu-se controlar todas as variáveis que pudessem provocar uma dispersão nos valores lidos, como por exemplo, a existência de outro tráfego, mesmo que reduzido.

Neste contexto, é de salientar o serviço ARP que realiza um *broadcast* inicial, de modo a obter o endereço MAC da estação para a qual existem dados para enviar. A influência deste serviço foi quantificada e considerada insignificante, na maior parte dos casos, contudo pode ser eliminada recorrendo à existência da *cache* associada.

A rede utilizada tinha um comprimento de 33 metros e as estações estavam igualmente espaçadas. Este comprimento é um majorante do comprimento máximo encontrado na aplicação descrita no capítulo seis.

4.5.4 Estatísticas

O sistema operativo utilizado, tal como a maior parte dos sistemas operativos, armazena um conjunto significativo de estatísticas relativas a vários aspectos do seu funcionamento. A nível da interface de rede, os sistemas operativos tipo Unix, guardam vários valores que podem ser acedidos pelo comando `netstat`. Entre estes conta-se o número de pacotes transmitidos e recebidos correctamente ou com erros, tal como os que sofreram colisões. No entanto, só é contabilizado o número total de colisões, pelo que não é possível obter qualquer parâmetro relativo ao número de colisões sucessivas de cada pacote, por exemplo, o valor médio.

É evidente a mais valia deste tipo de informação para um trabalho que pretende estudar o sistema de comunicação.

Estas estatísticas são obtidas através da leitura de registos do controlador de rede. Nos casos em que o número de interrupções é muito elevado, como, por exemplo, durante a utilização da opção `flood` (com um ou vários processos), registaram-se algumas inconsistências entre os dados obtidos pela aplicação, e os dados expressos nas estatísticas, em termos de pacotes transmitidos e recebidos. Introduzindo um atraso no processo emissor, verificou-se que as diferenças aumentavam, enquanto as estatísticas do emissor tinham correspondência a nível do receptor. Desta forma, comprovou-se a maior prioridade esperada no atendimento das interrupções, mas também na actualização das estatísticas relativamente aos processos do utilizador.

Em termos de erros, verificaram-se algumas diferenças entre as estatísticas armazenadas nos diversos nós. É possível que algumas inconsistências verificadas neste aspecto sejam imputáveis à componente analógica da interface de rede, muito expressiva no caso da *ethernet* [Tanenbaum, 88]. Por exemplo, o registo do número de colisões verificadas só com duas estações activas é geralmente diferente, com placas de rede idênticas. Além disso, no caso da placa D-Link, o registo das colisões e erros não é efectuado, isto apesar do *device driver* ser praticamente idêntico, a não ser nas rotinas de inicialização e fecho.

4.5.5 Monitorização da rede

Dispor de uma aplicação que identifique todo o tráfego que é suportado pela rede num dado instante, era extremamente importante no contexto deste trabalho. Para este efeito, foi utilizada a aplicação `tcpdump` [McCanne, 93], que logo demonstrou não conseguir suportar taxas de transmissão elevadas, concretamente, as resultantes da opção `flood` (só com um processo a ser executado), pelo que o seu uso foi limitado.

Neste sentido foi desenvolvida uma aplicação mais ligeira, mas também menos robusta e com menos opções, para tentar resolver esta situação, mas os incrementos de desempenho não foram suficientes para fazer face à situação mencionada.

No entanto, é de referir que os resultados registados nas estatísticas da interface revelaram sempre coerência entre os diversos nós, em termos de pacotes transmitidos, recebidos e pacotes perdidos com o respectivo erro.

4.5.6 Dimensão dos pacotes

Foram privilegiados os pacotes de tamanho mínimo do protocolo usado, o ICMP. Estes incluem, no mínimo, 56 bytes de dados, e resultam em pacotes ao nível da rede de 110 bytes, o que representa um *overhead* de quase 50%. Além disso, foram usados pacotes de 1 kbyte, visto ser o tamanho máximo considerado normalmente em ambientes fabris [ESPRIT, 92] e o tamanho que maximiza o desempenho das transferências FTP [Cabrera, 88]; pacotes de 300 bytes por ser o tamanho médio dos pacotes utilizados em transferências FTP registado em [Acharya]; e pacotes com o tamanho máximo de 1500 bytes, de modo a não existir segmentação. As duas primeiras dimensões foram as mais utilizadas, pelo contexto que se pretende simular.

Todos os valores de largura de banda ocupada são calculados tendo em consideração o preâmbulo e o campo de *checksum* do pacote *ethernet*.

4.6 Testes - 1ª parte

Com o objectivo de identificar as causas do menor desempenho nas aplicações distribuídas presentes nos sistemas de fabrico avançados, é necessário separar as várias parcelas envolvidas e caracterizá-las (fig. 4.4). É evidente que o estrangulamento depende das particularidades de cada aplicação, pelo que se pretendeu evidenciar os factores envolvidos e a sua contribuição para o desempenho global.

O facto de se ter optado por um serviço confirmado, de modo a caracterizar o tempo individual de cada pacote sem sincronização de relógios, traduz-se num número de parcelas superior, o que vem dificultar a tarefa. A alternativa de contabilização de tempos médios não se revela útil no nosso caso, devido à relevância do tempo de resposta.

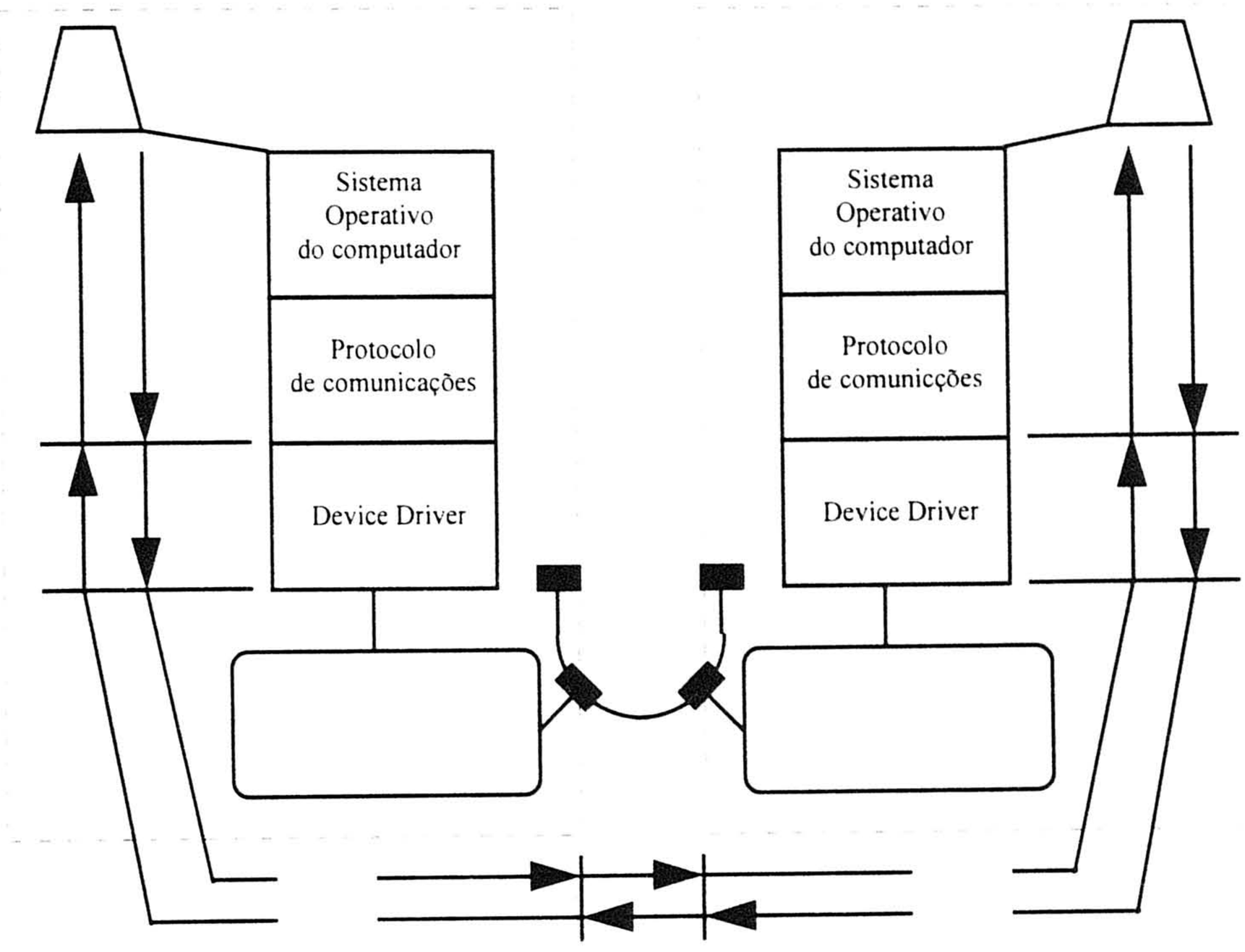


Fig. 4.4 - Sistema de Comunicação

4.6.1 Testes sem carga

Nesta primeira fase, pretendeu-se identificar a taxa máxima que era possível estabelecer entre dois dos PCs já descritos e qual era o factor limitativo. De modo a minimizar as perturbações nos resultados obtidos, os testes foram realizados de forma a não permitir a ocorrência de colisões. Estes testes recorreram à opção de `flood` da aplicação `ping`, já descrita, de modo a se obter os tempos individuais.

A ocorrência de colisões poderia ser provocada pela periodicidade mínima de 10 milisegundos desta opção, pois alguns tempos de serviço são muito superiores a este valor; ou por tráfego não previsto, por exemplo, um *broadcast* efectuado pelo serviço ARP. No entanto, este aspecto foi controlado através do número de colisões registado nas estatísticas da interface de rede.

Nestes primeiros testes, tornaram-se evidentes algumas diferenças de desempenho entre os PCs usados, através de diferenças nos resultados obtidos. Assim os valores médios apresentados resultam da média de todas as combinações possíveis entre os 3 PCs, não esquecendo que o

papel de emissor é diferente do papel de receptor, por factores que serão referidos posteriormente.

Os valores máximos e mínimos indicados não foram sujeitos a qualquer critério de uniformização.

Todos os resultados foram obtidos com as estações libertas de mais qualquer processamento, além do exigido pelos testes.

4.6.1.1 Apresentação de resultados

O facto de não existir nova transmissão enquanto não fosse processada a resposta anterior só foi possível pela inexistência de qualquer erro durante estes testes.

Por outro lado, a obtenção de valores que excedem largamente o tempo médio de operação prejudica, obviamente, a taxa de transmissão atingida. Contudo, a percentagem destes casos é mínima, e a dispersão de todos os valores é ínfima, correspondendo, regra geral, o tempo médio ao tempo mínimo de operação. Esta situação era esperada, dadas as condições em que se desenrolaram os testes, concretamente o controlo de fluxo implícito, e o facto de não terem ocorrido colisões, segundo as estatísticas.

Verifica-se que os valores máximos, para a taxa de transmissão, correspondem a tempos de serviço equivalentes aos valores médios sem repetição, pelo que não existe nenhuma redução de desempenho motivada pela maior cadência de transmissão.

4.6.1.2 Tempos de serviço máximos

A justificação para os tempos de serviço muito elevados, que ocorreram sempre de forma perfeitamente aleatória carece de análise. Neste sentido, a solução preconizada passou pelo recurso à aplicação `tcpdump` que era executada no PC não utilizado. Pelo facto, já descrito, desta aplicação ter dificuldades em acompanhar ritmos elevados, o que por sua vez era um indício do ponto de estrangulamento, a taxa de transmissão foi reduzida de modo a ser registada a totalidade dos pacotes. Esta redução foi efectuada pela introdução de um atraso a nível do emissor.

A resolução temporal da aplicação `tcpdump` é de 10 milisegundos, no caso do sistema operativo Linux.

O registo da totalidade dos pacotes revelou que a diferença temporal entre o envio do pedido e a sua resposta era sempre inferior a 10 milisegundos, tempos estes registados a nível da rede. No entanto, no emissor eram indicados alguns valores que excediam largamente este valor, pelo que se identificou o emissor como responsável pelos valores obtidos.

O facto do processo emissor ser executado no espaço reservado aos utilizadores, enquanto no receptor a resposta é processada a nível do núcleo, e do maior processamento envolvido no cálculo do tempo de serviço, são a justificação encontrada para os tempos anormalmente elevados. O primeiro facto apontado é muito relevante pois os espaços de memória adstritos ao núcleo e aos utilizadores são disjuntos, pelo que é necessário copiar toda a informação partilhada entre os dois espaços. Existe ainda a necessidade de copiar essa informação para o *buffer* presente na carta de rede.

4.6.1.4 Influência do tamanho dos pacotes

Alterando o comprimento dos pacotes no sentido crescente, registam-se algumas modificações (fig. 4.5):

- ▷ Menor quantidade de pacotes transmitidos (pacotes/segundo).
- ▷ Maior largura de banda ocupada (Mbps).

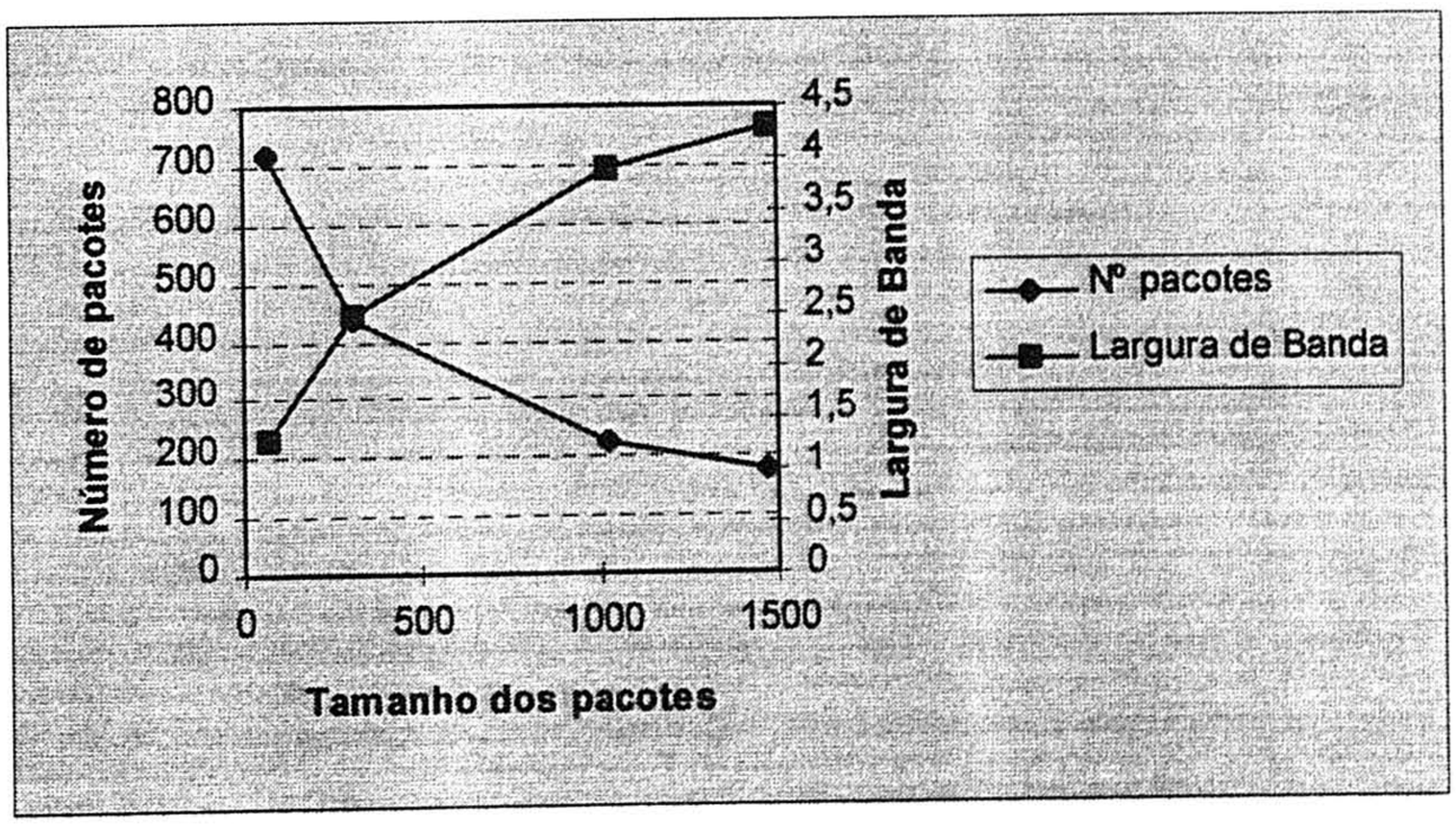


Fig. 4.5 - Influência do tamanho dos pacotes

Se se separar as tarefas a executar em dois grandes grupos, um relacionado com tarefas de controlo (atendimento de interrupções, por exemplo), e outro com transferência de informação entre as camadas do protocolo, intrínsecas ao sistema operativo, verifica-se que a importância

relativa do primeiro grupo vai diminuindo com o aumento do tamanho dos pacotes. No entanto, ainda existe um terceiro grupo de tarefas que engloba os cálculos necessários. Se o caso do cálculo do tempo de serviço é independente do tamanho do pacote, existem cálculos que dependem deste tamanho, como, por exemplo, o cálculo de *checksum*, que funciona como mecanismo de detecção de erros do protocolo ICMP. Devido a este facto, torna-se complexo identificar a influência deste grupo de tarefas face às modificações mencionadas.

De qualquer forma, pode afirmar-se que as tarefas que limitam o número de pacotes transmitidos estão relacionadas com as tarefas de controlo e de cálculo do tempo de serviço. Enquanto que o limite verificado ao nível da largura de banda, deve ser motivado pelas tarefas de transferência de informação, e cálculo de *checksums*.

4.6.1.4.1 Tempo da transmissão

Esta análise só está a considerar os aspectos envolvidos a nível de sistema operativo. Naturalmente, o aumento do tamanho dos pacotes traduz-se num maior tempo de transmissão no meio físico, dado que a taxa de transferência é constante. Este intervalo, que era pouco significativo (inferior a 13% para as duas transmissões) para os pacotes de tamanho mínimo, deixa de o ser para os pacotes de tamanho máximo (cerca de 40%). Todos os valores referidos são valores médios de serviço, sem qualquer tipo de carga sobre os diversos intervenientes.

4.6.1.4.2 *Device loopback*

A existência do *device loopback* tem como um dos principais objectivos, testar o funcionamento correcto do protocolo de comunicação, confinando a execução das aplicações que o usam à própria estação, pela substituição do *device driver* associado à placa de rede.

De salientar que o controlador de rede presente em todas as placas de rede utilizadas durante os testes, também possui mecanismos de *loopback*, concretamente três. Estes diferem na profundidade de transmissão que atingem:

- O controlador de rede.
- A interface série de rede.
- O próprio cabo.

A utilidade destes mecanismos consiste no diagnóstico de anomalias relacionadas com a placa de rede. Estes mecanismos não são transpostos pelo *device driver* como serviços disponibilizados às camadas hierarquicamente superiores do protocolo de comunicações, pelo que não foram usados.

No emissor coexistem várias parcelas cuja importância no resultado final não é conhecida, pelo que, para tentar esclarecer melhor esta situação, o mesmo serviço foi invocado para o *device loopback.*

Para os pacotes de tamanho mínimo, o tempo encontrado corresponde a 71% do valor médio verificado tendo outra estação como destinatária da transmissão. O valor anteriormente referido corresponde, para o tamanho máximo, a uma percentagem de 35%.

No entanto, este valor não quantifica a transferência de informação entre o protocolo de comunicações e os *buffers* de transmissão e recepção do controlador de rede, pelo que esta parcela associada à interface entre sistema operativo e *hardware,* pode influenciar decisivamente os resultados obtidos, principalmente no contexto de maiores quantidades de informação. Por outro lado, não quantifica o intervalo de tempo dispendido com o atendimento de interrupções (fig. 4.6).

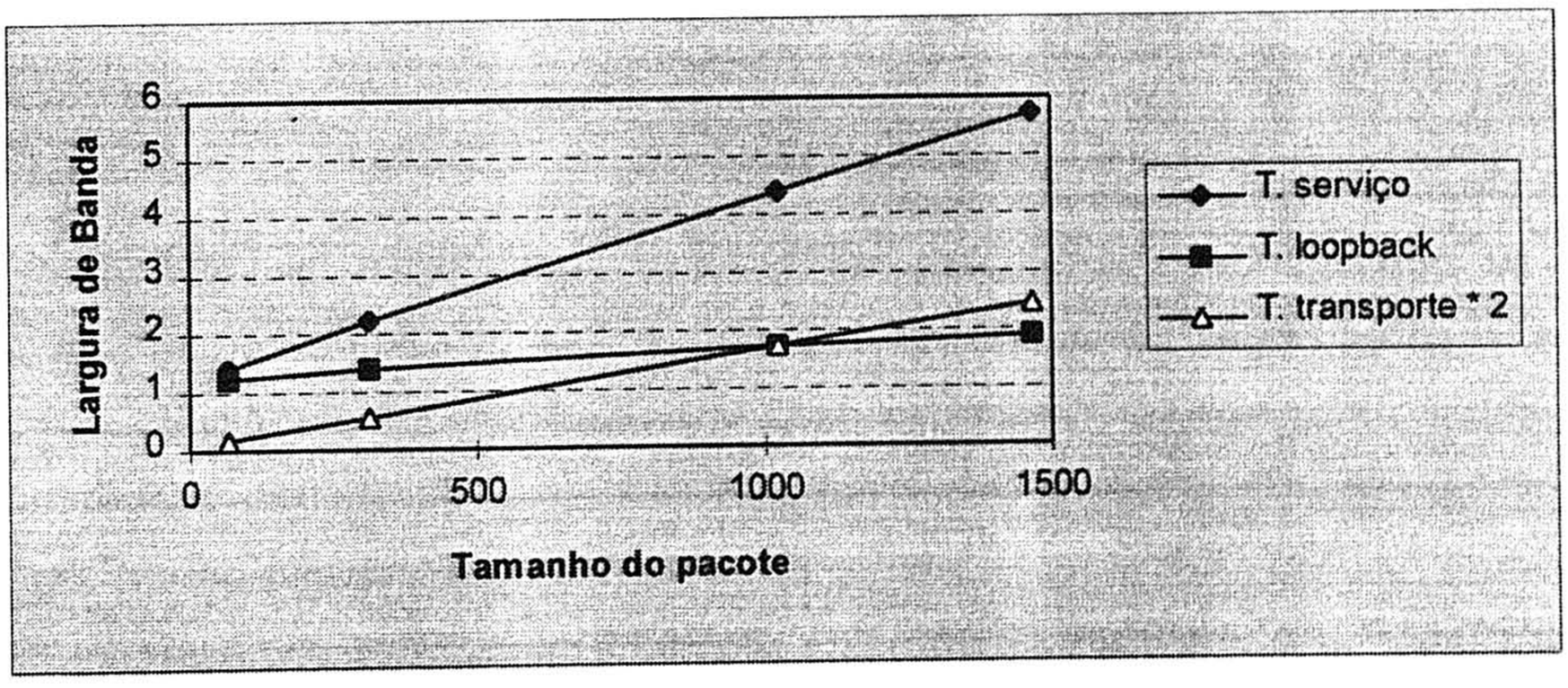


Fig. 4.6 - Componentes do tempo de serviço

4.6.1.4.3 Tempos máximos

Não é possível tirar conclusões acerca dos valores máximos de tempo de serviço, dado não ter sido verificada nenhuma correlação entre estes valores e o tamanho dos pacotes. No entanto, analisando estatisticamente os resultados de cada teste, é notória uma maior dispersão dos

valores que excedem os valores médios associados aos ensaios efectuados com pacotes pequenos.

Este facto poderá ser explicado pelos números já apontados, nomeadamente, a percentagem do tempo de serviço gasta na transmissão pela rede. Existe ainda outro valor que pode ajudar a esclarecer esta situação: o tempo de serviço acumulado. Este parâmetro quantifica a percentagem de tempo que o nó está envolvido na transmissão e recepção dos pacotes, o que não significa, obviamente, que este tempo seja totalmente atribuído ao processo emissor ou às tarefas relacionadas com este.

Esta percentagem de tempo varia entre 83% para os pacotes de tamanho mais reduzido e os 94% para os pacotes maiores.

Dado que o sistema operativo tem um conjunto de tarefas associadas (normalmente expressas no conceito de *daemon*), que são executadas regularmente, o escalonamento destas tarefas e a sua influência nos resultados é mais relevante quando existe um número superior de tarefas de controlo, concretamente, atendimento a interrupções. Por outro lado, o facto da percentagem da responsabilidade da rede ser relevante para os pacotes maiores, permite que o sistema operativo não seja tão solicitado.

Neste contexto, é de salientar o facto de em alguns testes mais exigentes em termos de desempenho do emissor (por exemplo, dois processos de `flood ping` com periodicidade mínima de 10 milisegundos), resultarem em erros de transmissão na camada de aplicação, enquanto os pacotes eram detectados no receptor, e nas estatísticas do emissor. Os erros poderiam resultar de anomalias detectadas durante as verificações associadas à recepção dos pacotes, mas esta possibilidade é extremamente reduzida, ou devido a estrangulamentos presentes a nível das camadas mais baixas do protocolo de comunicação do emissor, dado que este também é mais solicitado. No entanto, não se deve esquecer que o tratamento associado às camadas referidas é realizado de forma prioritária, como pode ser comprovado pela correcta actualização das estatísticas. Concluindo, estes erros resultam de insuficiências do tempo atribuído ao processo emissor.

4.6.1.5 Conclusões

Foram realizadas a decomposição das várias parcelas do sistema de comunicação que coexistem no emissor, com a resolução possível sem implicar a análise de cada função executada pelo

protocolo de comunicação e sistema operativo, e a análise da dependência destas parcelas face ao tamanho dos pacotes.

As taxas máximas de transmissão correspondem ao tempo de serviço mínimo obtido nas condições menos exigentes. Assim, conclui-se ser possível manter esse tempo de serviço mesmos com transmissões sucessivas, o que revela que não existem limitações em nenhuma das parcelas referidas, nomeadamente, nas parcelas do emissor.

Os valores máximos atingidos que excedem largamente o tempo médio de serviço são da responsabilidade do sistema operativo, que não possui garantias de determinismo ao nível de atendimento de interrupções e, muito menos, previsibilidade no tempo atribuído a cada processo do utilizador, que está sujeito ao escalonamento e às interrupções que vão surgindo. Dados os valores temporais que estão envolvidos, verifica-se que a latência de interrupções exigida é significativa, pelo que, por exemplo, um acesso não previsto ao disco duro pode provocar distorções acentuadas.

Por outras palavras, pelo facto de não se tratar de um sistema operativo tempo-real, além da parcela de não determinismo associado à comunicação, ainda se vem juntar o não determinismo do sistema operativo e protocolo de comunicação agregado. Nestes primeiros ensaios a segunda parcela foi mais visível, enquanto a intenção final do estudo centra-se sobre a primeira. No entanto, era necessário caracterizar a plataforma de testes em primeiro lugar, na qual foi identificada a sua grande desvantagem aquando da introdução de mais uma medida de dispersão no sistema de comunicação.

Verifica-se assim que o factor limitativo, no contexto dos pacotes pequenos, se encontra nas tarefas de processamento relacionadas com a transmissão e recepção de pacotes. Enquanto para pacotes maiores, a relevância dos tempos de transferência de informação no seio do sistema operativo assume maior significado.

É de referir que a singularidade registada com os pacotes de 1024 bytes, que tinha acontecido em [Cabrera, 88], não se verificou. Este tamanho não obtém melhores características de desempenho que os tamanhos na vizinhança. Este facto foi explicado no estudo referido pela utilização de *buffers* de memória *(mbuf)*, de tamanho 128 bytes ou de 1024 bytes, pelo que este tamanho minimizava as cópias necessárias. No entanto, este tamanho foi aumentado para as versões mais recentes do sistema operativo então usado, o BSD4.2. No sistema operativo Linux os *buffers* (denominados *sk_buff*) associados ao protocolo de comunicação utilizam um princípio diferente descrito, em [Cox, 96], em que o tamanho dos *buffers* é variável.

No entanto, é importante salientar o aumento de desempenho verificado nas plataformas de baixo custo, com uma evolução muito rápida. Se a taxa de transmissão de 10 Mbps era mais que suficiente na altura em que surgiu, e se as plataformas que conseguiram gradualmente atingir valores daquela ordem de grandeza envolviam custos muito elevados, neste momento a situação é radicalmente diferente. A nível de PCs já é possível encontrar propostas com maiores níveis de desempenho comparativamente aos que foram usados.

4.6.2 Testes de capacidade máxima

Apesar dos ensaios terem sido realizados com as estações exclusivamente dedicadas, não esquecendo as tarefas associadas ao sistema operativo, o modo como foram realizados, com necessidade de processamento das respostas e envio só depois, não permitem concluir acerca da capacidade máxima de gerar tráfego.

Neste sentido foram realizados ensaios que pretendem identificar a capacidade máxima de geração de tráfego. Os testes decorreram sem qualquer tráfego presente na rede e onde o processo emissor tinha como única tarefa a transmissão de pacotes, o que apesar de ser uma situação pouco realista, serve para obter conhecimento acerca da ordem de grandeza dos valores envolvidos. Por outro lado, é um teste ao correcto funcionamento de todos os elementos do sistema.

Apesar de se tratarem de testes em que não se obtém o tempo de serviço individual de cada pacote, este facto não é relevante para o objectivo pretendido. A confirmação da efectiva transmissão dos pacotes foi efectuada pelas estatísticas armazenadas no receptor.

Como resultados mais relevantes destes ensaios são de referir uma capacidade de gerar tráfego (em número de pacotes) 63% superior para pacotes de tamanho mínimo e de cerca de 75% superior para pacotes de tamanho máximo. Esta diferença reflecte o peso relativo das parcelas envolvidas na transmissão de cada um dos tamanhos de pacotes. Neste caso, o valor superior em percentagem atingido para os pacotes maiores está relacionado com o maior tempo de transmissão destes, que não condiciona os resultados obtidos. Isto só acontecia se a largura de banda de 10 Mbps fosse excedida, o que, embora os valores atingidos se aproximem deste limite, não chega a acontecer.

Uma chamada de atenção para o facto dos pacotes continuarem a incluir um campo de *checksum*, pelo que o emissor tem que efectuar o seu cálculo. Os resultados encontram-se registados na figura 4.7.

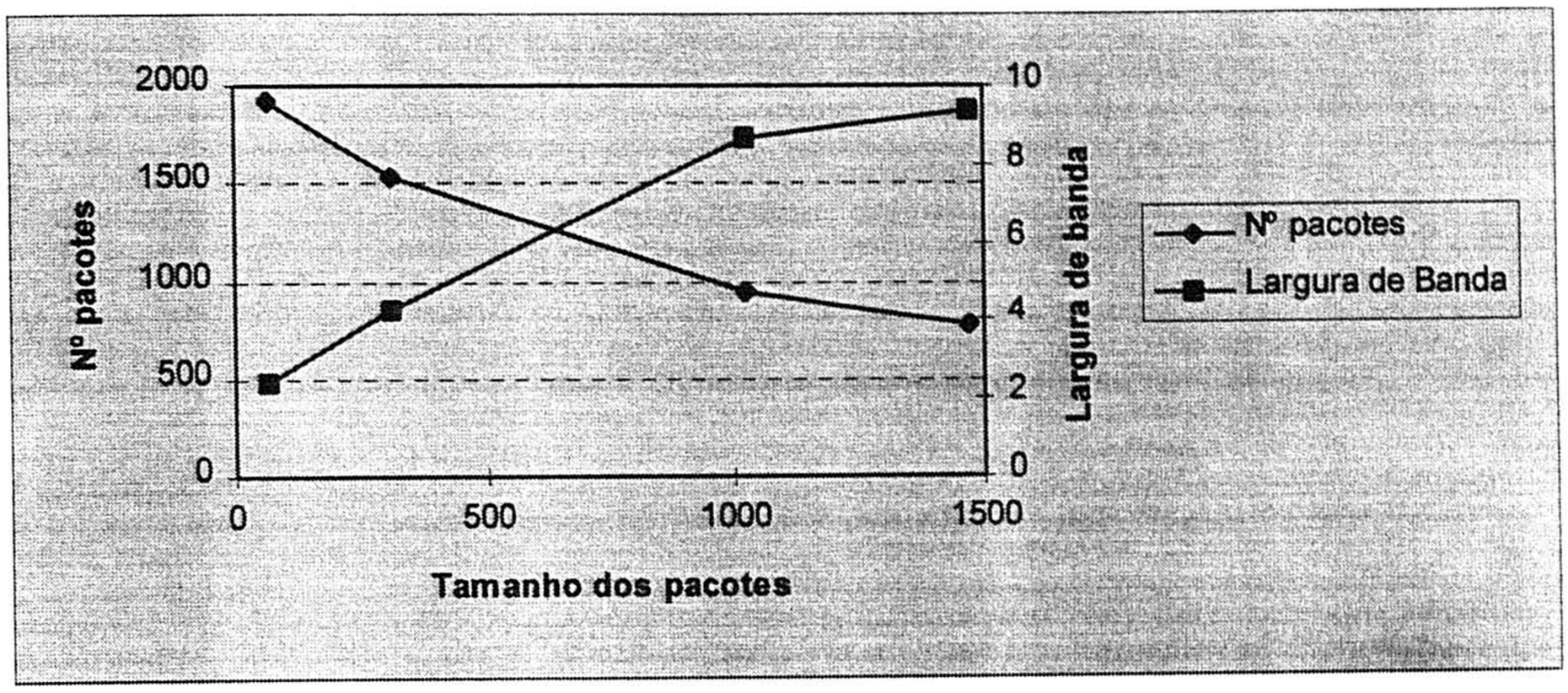


Fig. 4.7 - Capacidade máxima

4.6.3 Carga no receptor

Para avaliar a degradação do desempenho provocada pelo facto de o receptor não estar dedicado exclusivamente, foi testada a situação em que o receptor está a efectuar uma compilação. Esta fórmula é normalmente usada nestas situações, nas quais é importante que não exista carga adicional sobre a interface de rede. A compilação implica vários acessos ao disco, além de ser uma tarefa exigente em termos de tempo do processador.

Tal como esperado, esta carga suplementar ao nível do receptor não se traduz em incrementos significativos no tempo de serviço, tendo este sofrido um incremento de 7%, em termos médios, para os pacotes de tamanho mínimo. Este foi o valor mais alto, cuja explicação reside na maior exigência das tarefas denominadas de controlo, para este género de pacotes. Estas tarefas são as mais prejudicadas pela compilação. Os resultados obtidos estão na figura 4.8.

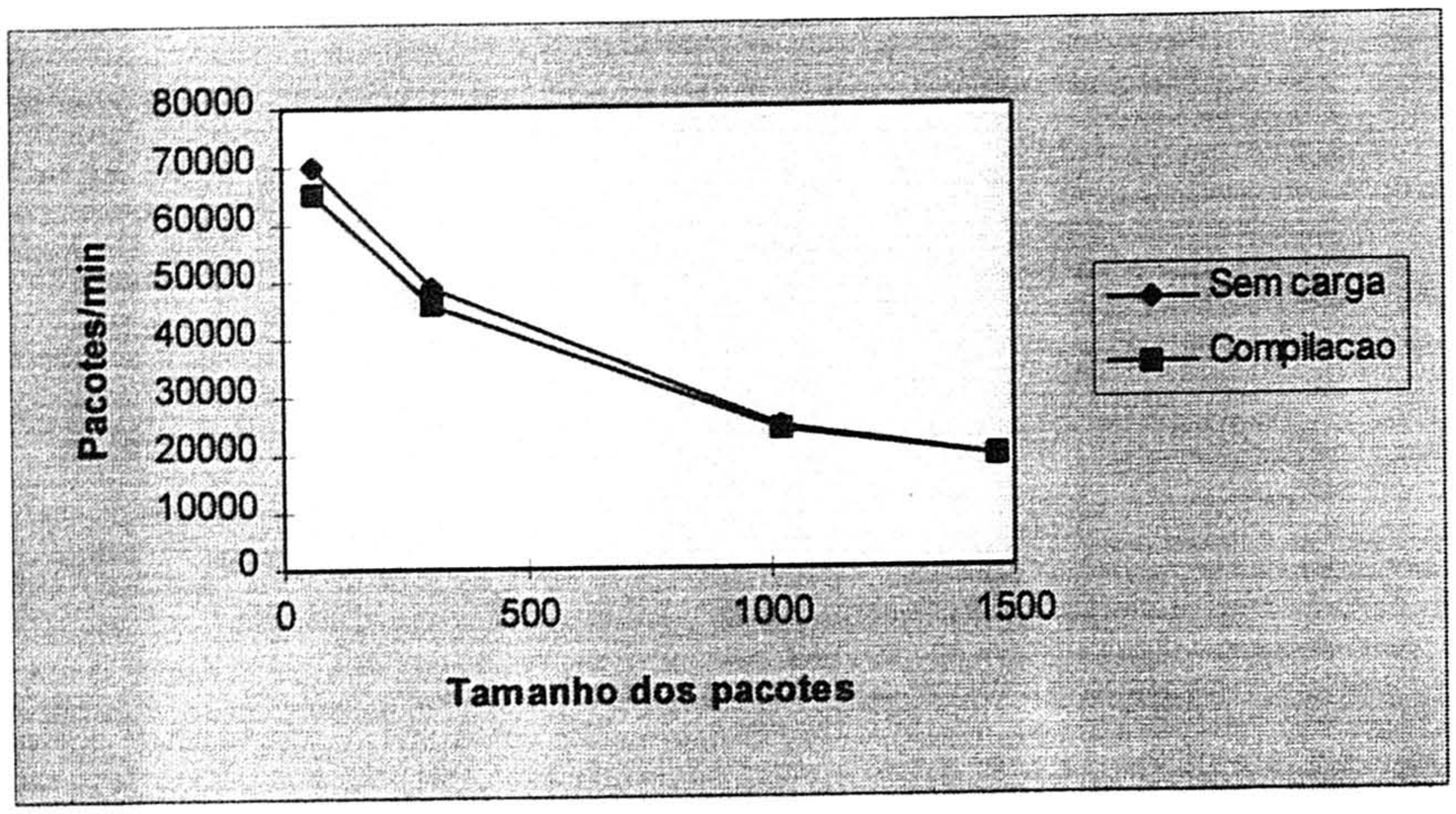


Fig. 4.8 - Carga no receptor

4.6.4 Carga no emissor

Nos testes efectuados até este ponto, o emissor é sempre o elemento do sistema de comunicação mais solicitado, e o que tem limitado os valores obtidos, exceptuando os testes imediatamente anteriores.

Exemplo disto são as diferenças significativas obtidas conforme a saída dos dados (fig. 4.9). O facto de não se produzir qualquer tipo de saída durante os testes permite incrementos de cerca de 10% em termos de pacotes processados, relativamente à saída *standard* da opção `flood` que consiste no colocar de um ponto no monitor, por cada pacote transmitido e de um *backspace*, por cada pacote recebido.

Em termos médios, é de registar que colocar os valores no monitor ou no disco duro, é mais penalizante do que o facto de decorrer em paralelo uma compilação. No entanto, não se pode esquecer que a introdução de um atraso no processo emissor se reflecte directamente nos tempos de serviço, situação esta que não se verifica com o efeito de carga no emissor.

A introdução de um atraso significativo no processo emissor ou no próprio emissor, inclusivamente, deve provocar o não processamento de alguns pacotes, caso seja imposta uma periodicidade mínima de transmissão.

Estes ensaios tinham como objectivo verificar que os tempos de serviço obtidos eram fortemente influenciados pelo tempo de processamento atribuído ao processo emissor, o que justificaria os valores muito elevados de alguns tempos de serviço. Como prova desta afirmação, registam-se os

tempos máximos de serviço muito superiores para os ensaios efectuados com escrita dos dados no disco duro e com a compilação em paralelo. Conclui-se que as interrupções motivadas pelos acessos ao disco duro serão, provavelmente, a razão dos valores muito elevados.

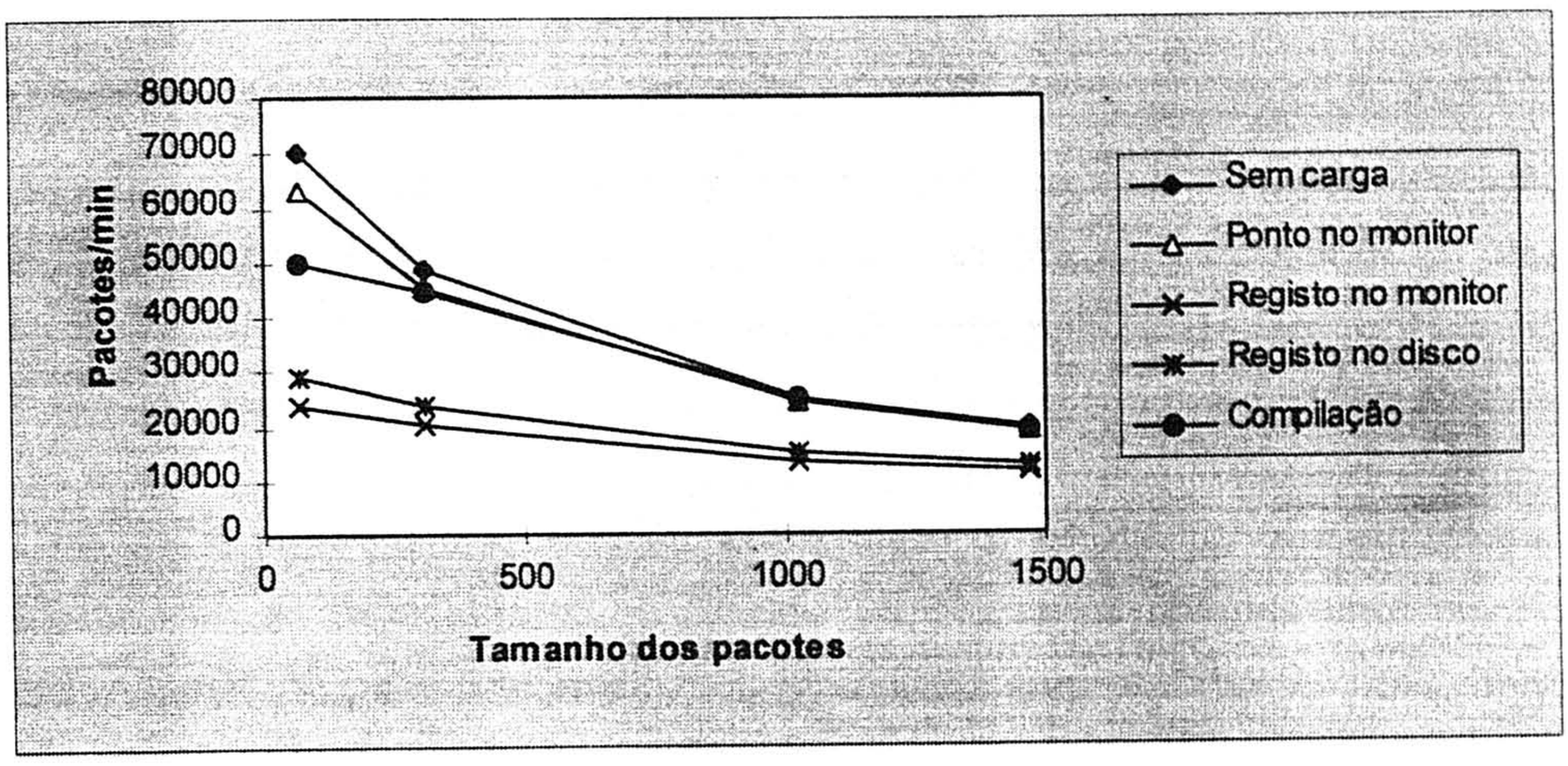


Fig. 4.9 - Carga no emissor

4.6.5 Conclusões

No contexto do sistema operativo do emissor, é complexo identificar as tarefas que limitam a taxa máxima verificada para os diversos tamanhos de pacotes. Mesmo caracterizando essas tarefas por grupos, dado que não é conhecido o peso das diversas parcelas, torna-se árduo conseguir aprofundar o que já foi referido a este respeito.

Se, para o mesmo número de pacotes, o tempo dispendido na chamada de interrupções, de mudança de contexto e no cálculo do tempo de serviço, não varia com o tamanho, já o tempo envolvido em tarefas de transferência de dados e de cálculo de *checksum* depende significativamente deste parâmetro.

É de relembrar o facto dos espaços de memória não serem partilhados, o que implica a existência de funções que efectuem a transferência de informação entre o espaço reservado aos processos do utilizador e espaço atribuído ao núcleo.

A nível desta aplicação em concreto, verifica-se que, além dos cálculos necessários para o *checksum*, que faz parte do protocolo ICMP, ainda se têm os cálculos do tempo de serviço, que não dependem do tamanho do pacote.

As tarefas desempenhadas pelo protocolo de comunicação, neste caso, são relativas à gestão das estruturas de informação (construção do pacote, por exemplo) e à transferência de dados entre elas. Um estudo mais pormenorizado a nível dos protocolos TCP e UDP pode ser encontrado em [Cabrera, 88] e informação mais detalhada sobre todos os aspectos de implementação do protocolo TCP/IP em [Stevens, 95].

No entanto, estas referências incidem sobre as versões BSD do sistema operativo Unix e, como já foi referido, os processos de gestão dos *buffers* de memória são diferentes em Linux. Uma análise detalhada do protocolo TCP/IP, e dos seus pormenores de implementação em Linux, afasta-se do objectivo desta dissertação.

A inclusão da camada de transporte do protocolo TCP/IP seria o próximo passo no sentido de caracterizar mais uma camada envolvida no sistema de comunicação. A caracterização desta camada, importante para assegurar a fiabilidade de transmissão e a comparação experimental entre os serviços TCP e UDP, no contexto dos sistemas de fabrico, apesar de relevante para o nosso estudo, afasta-se do objectivo principal. Além disso, a complexidade associada ao protocolo TCP e a todos os mecanismos que o constituem (por exemplo, os mecanismos de retransmissão), é significativa (RFC 1323, [Jacobson,92]), pelo que iria introduzir mais uma medida de dispersão nos valores obtidos. Por outro lado, já se verificou que, com os recursos envolvidos, não é fácil atingir utilizações muito significativas ao nível da rede, pelo que o custo em desempenho associado a esta opção seria relevante.

Os testes já descritos servem para identificar e tentar quantificar a ordem de grandeza das parcelas envolvidas. Dado que o sistema de comunicação não se restringe apenas à rede de comunicação e ao seu mecanismo de acesso, é necessário contextualizar os outros factores envolvidos.

4.7 Testes - 2ª parte

O foco deste estudo é a rede *ethernet*, apesar da sua simbiose com o protocolo TCP/IP resultar num elemento integrador muito válido no contexto dos sistemas de fabrico. Esta segunda parte de testes poderia ser denominada de carga na rede, pois, agora que os outros elementos do sistema de comunicação foram analisados, podem avaliar-se os resultados provocados pelo facto de existir tráfego na rede.

No contexto das parcelas de tempo dependentes da rede de comunicação, já foi identificado o tempo de transmissão, que é regulado pela taxa de transferência. A outra parcela que pretende ser evidenciada com este conjunto de testes é a do tempo de acesso ao meio.

Nas aplicações fabris podem coexistir vários tipos de tráfego, nomeadamente em termos de tamanho de pacotes. A transferência de grandes quantidades de informação, o que acontece, por exemplo, aquando da descarga *(download)* de programas para os vários elementos presentes na planta fabril, tem toda a vantagem em ser efectuada recorrendo a pacotes de maior comprimento. Este tipo de transferência é, no entanto, pontual. A transmissão das medidas efectuadas, de comandos, de alarmes e de confirmações, necessária em ambiente fabril, é processada, normalmente, por pacotes de tamanho reduzido. Contudo, existem excepções a esta descrição genérica, por exemplo, em aplicações fabris onde exista transmissão de imagem.

Por outro lado, só são atingidas percentagens de utilização significativas recorrendo a pacotes de tamanho considerável, dados os recursos disponíveis.

4.7.1 Três emissores, um receptor

Apesar da evolução no sentido das arquitecturas de controlo distribuídas, a existência de um elemento centralizado, geralmente denominado controlador de uma dada área, que congrega um conjunto de informações obtidas por diversas fontes, ainda se verifica na maioria das aplicações.

Neste sentido, recorreu-se a uma plataforma que conseguisse processar todo o tráfego gerado pelos três PCs. A escolha recaiu sobre uma *workstation* Next Cube. De qualquer forma, o modo de operação dos testes assegura um controlo de fluxo implícito, visto só transmitir novo pacote aquando da recepção do anterior.

É de salientar que comparativamente aos PCs, a *workstation* é mais lenta a processar os pacotes pequenos e mais rápida com os pacotes de tamanho maior. Isto resulta do peso relativo das tarefas já mencionadas, confirmando uma mais rápida transferência de informação, e um menor desempenho no atendimento de interrupções, por parte da *workstation.*

4.7.1.1 Tráfego à taxa máxima

Os testes efectuados, nos quais os três emissores transmitiam à mais alta taxa, pacotes do mesmo tamanho para a *workstation,* revelaram resultados surpreendentes, principalmente com os pacotes

de maior tamanho, o que corresponde a maiores utilizações de largura de banda. Os pacotes maiores, além de existirem em menor número, uniformizam as diferenças de desempenho existentes entre os PCs e ocupam a rede durante mais tempo. Desta forma, favorecem um efeito de sincronização entre as transmissões, que é fortalecido pelo facto do destinatário ser o mesmo.

Este efeito de sincronização permitiu atingir larguras de banda significativas (9 Mbps) com um número de colisões reduzido. Deste modo, verificou-se que o estrangulamento neste caso era a nível do receptor para os pacotes pequenos, limitando a taxa de transmissão dos emissores através do controlo de fluxo implícito. No caso dos pacotes de maior dimensão, a rede também pode ter constituído uma limitação.

No entanto, nos casos mais exigentes o equilíbrio atingido era instável, pelo que qualquer perturbação provocada, por exemplo, pelo sistema operativo de qualquer nó podia resultar numa quantidade significativa de pacotes perdidos. Isto porque, em todos os casos, a transmissão era efectuada com uma periodicidade mínima de 10 milisegundos, pelo que a quebra do equilíbrio traduzia-se num período transitório com vários pacotes perdidos, visto não haver controlo de fluxo.

Nos casos limite em termos de largura de banda, ou seja, para os pacotes de tamanho máximo, a capacidade da rede estava no seu limite superior, pelo que a inexistência de colisões dependia do controlo de fluxo imposto pelo receptor. Caso este equilíbrio fosse quebrado, verificava-se uma saturação completa da rede, com a consequente perda de pacotes por excesso de colisões, e sem que fosse possível atingir o equilíbrio dado que a periodicidade mínima, juntamente com as retransmissões dos pacotes, mantinham a utilização da rede em valores muito elevados.

No entanto, para larguras de banda ligeiramente inferiores nunca se verificaram perdas de pacotes e o número de colisões era reduzido, o que serve para demonstrar que se não forem criadas condições de concorrência efectiva entre as diversas fontes de informação, os resultados expressam valores que têm que ser encarados com cuidado.

É de notar, que mesmo nas condições mais adversas, nunca se registaram erros motivados pelo *overflow* da estrutura FIFO do controlador, nem erros de não processamento por parte do núcleo, o que é demonstrativo da robustez da implementação.

Por outro lado, nos ensaios em que a rede não era o estrangulamento (todos exceptuando os testes com os pacotes de tamanho máximo), dado que os emissores não funcionavam no limite das suas capacidades, os tempos de resposta máximos baixaram e através da análise dos tempos individuais verificou-se que em qualquer dos testes a percentagem dos pacotes que sofriam atrasos superiores a 10 milisegundos era inferior a 0,1%. Estes tempos de serviço pouco

frequentes podem ter origem num conjunto de factores, concretamente o funcionamento do sistema operativo dos emissores, e no facto do receptor estar sujeito a uma carga significativa; mas, pelo facto de haver colisões em alguns destes testes, a explicação também pode residir em colisões sucessivas. Isto é, apesar da percentagem de colisões ser sempre reduzida (inferior a 3% em todos os testes), não é possível separar a causa dos atrasos.

Relativamente aos valores médios, o acréscimo verificado dependeu significativamente do tamanho dos pacotes; no entanto, ao contrário do que se poderia pensar, foi menos visível nos testes com pacotes maiores, nos quais a largura de banda ocupada era maior. Assim, verifica-se que o facto da largura de banda disponível ser menor não condicionou os resultados em larga escala. Esta constatação reforça o que foi dito acerca da sincronização, além de ser uma indicação de que foi efectivamente o receptor o elemento que mais contribuiu para este aumento dos tempos de serviço.

4.7.1.2 Tráfego eventual

Mantendo a mesma configuração, ou seja, a arquitectura centralizada, utilizou-se um PC a transmitir à taxa máxima, para atingir valores o mais elevado possíveis de largura de banda ocupada com pacotes de um dado tamanho. Os outros dois PCs tentavam aceder ao elemento centralizado com periodicidades muito baixas, para evitar a sincronização, e com pacotes de tamanho mínimo.

Este cenário pretende simular experimentalmente o problema de transmissão de, por exemplo, um alarme quando existe tráfego essencialmente periódico de um dado tamanho de pacote, situação que pode ocorrer quando existe uma transmissão de um programa (*download*).

Nos estudos de caracterização de tráfego realizados, uma das conclusões apontou sempre na existência de grandes quantidades de tráfego pontuais *(bursts)*. No entanto, o facto de no nosso ensaio o tráfego ser igualmente distribuído ao longo do tempo, pretende simular as situações descritas.

O facto de duas das fontes transmitirem a cadências muito baixas, também permite imputar os atrasos máximos verificados à rede de comunicação, e não ao emissor, apesar de esta afirmação poder não ser totalmente verdadeira, devido ao funcionamento do sistema operativo. Por outro lado, é conveniente lembrar que o receptor é um potencial ponto de estrangulamento.

Para o caso mais exigente, ou seja, com os pacotes de tamanho máximo, dado que ocupam mais largura de banda e ocupam o canal por mais tempo, o que aumenta a probabilidade de duas ou

mais fontes estarem à espera do cessar da transmissão para iniciarem a sua, registaram-se pacotes perdidos.

A perda de pacotes de tamanho mínimo que competiam pelo acesso ao meio foi causada por excesso de colisões, e registou-se em cerca de 1% dos pacotes. A largura de banda ocupada, por pacotes de tamanho máximo, foi de aproximadamente 50% da capacidade total, em termos médios. Estas perdas registaram-se a nível do emissor de baixa periodicidade e nunca no elemento central. As transmissões deste nó têm menos concorrência efectiva pelo facto dos nós não transmitirem sem receberam a resposta anterior. Por outro lado, os emissores que transmitem muito mais pacotes acabam por esbater, percentualmente, o número de pacotes que sofreram de excesso de colisões.

Os tempos de serviço médio duplicaram relativamente à situação sem tráfego, o que também pode ser devido à carga no receptor. Os tempos máximos registados foram quase sempre inferiores a 11 milisegundos, a menos de uma percentagem muito variável, mas pouco significativa, de pacotes com tempos muito superiores ao valor apontado, que podem ter sido provocados pelos inúmeros factores já referidos.

Nos restantes testes com tráfego significativo de pacotes de 1024 bytes, de pacotes de tamanho mínimo e ainda de tráfego misto composto por pacotes de tamanho mínimo e de 1024 bytes transmitidos à taxa máxima por duas fontes, não se registaram percentagens assinaláveis de pacotes perdidos (sempre inferior a 0,04%) por parte das fontes de baixa cadência.

É de assinalar que ao nível do nó ou nós que desempenharam as funções de ocupação de largura de banda, os valores médios de serviço aumentaram ligeiramente e a percentagem de pacotes perdidos foi sempre inferior a 0,005%. Este valor tem que ser analisado com cuidado pois nos testes em que só existiu uma fonte deste género, o tráfego concorrente é muito pontual; com duas fontes a transmitir à taxa máxima, existe o efeito de sincronização do receptor, mesmo nos testes com tráfego misto.

De qualquer forma, a existência de uma percentagem não desprezável de pacotes perdidos num dos casos, é suficiente motivo para alarme.

4.7.2. Dois emissores, dois receptores

4.7.2.1 Tráfego à taxa máxima

Neste conjunto de testes, caso as duas ligações sejam efectuadas com o mesmo tamanho de pacote e com taxas de transmissão equivalentes, verifica-se o mesmo efeito de sincronização já referido, como pode ser atestado pela percentagem de colisões que nunca excedeu 1,3%.

No entanto, se estabelecermos estas ligações tornando-as o mais diferente possível em termos de taxas de transmissão (exequível pelo facto das estações serem diferentes), surgem problemas com os pacotes de tamanho máximo, que correspondem a uma largura de banda ocupada superior. Neste caso, obteve-se uma perda de pacotes de 1%, no pior dos testes realizados.

Verifica-se, mais uma vez, que com larguras de banda elevadas (cerca de 8 Mbps), caso não seja estabelecido sincronismo (que de, qualquer forma, é uma situação de equilíbrio instável), a ocorrência de pacotes perdidos por excesso de colisões é provável, apesar de afectar um número reduzido de pacotes. No entanto, estes valores de largura de banda só são atingidos com pacotes de elevado tamanho, o que favorece a ocorrência de sincronização.

4.7.2.2 Tráfego eventual

O objectivo destes ensaios era o de estabelecer uma ligação que ocupasse uma largura de banda significativa, com um dado tamanho de pacotes. A outra ligação era estabelecida com uma cadência muito reduzida de modo a contabilizar o tempo de serviço, e assim, não existiria estrangulamento a nível do receptor, nem do emissor.

Mais uma vez só se obtiveram erros para os pacotes de tamanho máximo. Nos outros testes, os tempos médios de serviço aumentaram ligeiramente, e os tempos máximos mantiveram-se próximos dos valores médios, a não ser em casos muito esporádicos.

A ligação que tinha como objectivo absorver a maior percentagem possível da capacidade da rede, consegue atingir cerca de 50% da capacidade total para pacotes de tamanho máximo. A outra ligação, na qual a rede é por exclusão de partes o ponto de estrangulamento, registava tempos de serviço médios cerca de 50% superiores aos tempos mínimos e verificados em condições sem tráfego. Além dos pacotes perdidos por excesso de colisões que foram

ligeiramente inferiores a 1% do total, realizando a média de todos os testes, registaram-se pacotes com tempos de serviço muito superiores à média verificada.

É de referir, que foram realizados testes nestas condições, nas quais a ocorrência de pacotes perdidos não se registou. No entanto, na sua grande maioria registavam-se sempre erros de transmissão por excesso de colisões numa percentagem média ligeiramente inferior a 1%. Este valor nunca excedeu os 1,3%.

4.7.3 Testes sem eco

A opção por ligações com eco na totalidade dos testes descritos até aqui, foi adquirir a maior quantidade de informação possível. Mesmo quando o objectivo de uma ligação era apenas o de gerar a maior quantidade de tráfego possível, este modo de funcionamento permitia a verificação da existência de anomalias também nesta ligação. A desvantagem consistiu no facto de não se conseguir larguras de banda significativas (superiores a 4 Mbps), sem recorrer aos pacotes de tamanho muito elevado.

Esta situação levou a que só com os testes mais exigentes ocorressem pacotes perdidos por excesso de colisões. A exigência destes testes não reside apenas na largura de banda ocupada, que não se pode considerar muito elevada (cerca de 5 Mbps), mas também no facto dos pacotes serem de grande dimensão, o que aumenta a probabilidade de colisão, devido aos factores já referidos.

Os ensaios realizados até aqui revelaram-se limitados, quanto às condições de exigência, para os tamanhos de pacotes que assumiam maior importância, os de tamanho mínimo e os de 1024 bytes. Devido a este facto, efectuaram-se alguns testes nos quais a metodologia seguida até aqui, ou seja, ligações com eco, foi abandonada, de modo a conseguir atingir maiores larguras de banda.

Já que o objectivo principal de uma das ligações era o de absorver largura de banda, então o registo dos tempos de serviço desta ligação era secundário. De qualquer forma, as estatísticas das interfaces de rede eram suficientes para verificar a ocorrência de erros, colisões, e para caracterizar o tráfego em valores médios.

Desta forma, era possível simular as situações pretendidas, que eram a existência de altos valores de tráfego na rede composto por pacotes com o comprimento referido, e quantificar o tempo de acesso por parte de uma estação que desejasse transmitir um pacote. Este serviço é normalmente

do tipo confirmado, pelo que se continuou a utilizar a aplicação `ping` para conseguir a obtenção do tempo de serviço. No sentido de assegurar que os tempos de serviço reflectissem os problemas de acesso ao meio de comunicação, o processamento e a cadência de transmissão foram extremamente baixos, nas duas estações envolvidas.

Foram realizados diversos testes, nos quais a largura de banda ocupada por pacotes de 1024 bytes variou entre 4 Mbps e 9,5 Mbps. Para cada uma destas utilizações, o acesso era tentado a cadências muito baixas pelas duas estações restantes, com pacotes de tamanho mínimo.

Em todos os ensaios, os tempos de serviço médios não excederam os 4,4 milisegundos, e os casos de pacotes perdidos por excesso de colisões foram insignificantes. Os tempos de serviço máximos atingiram alguns valores muito elevados, mas mais uma vez o número que ultrapassou os 10 milisegundos foi pouco expressivo. O número de colisões foi sempre reduzido, tipicamente inferior a 1%; contudo, existiram casos em que este número atingiu os 7%.

Outros testes recorreram somente a pacotes de tamanho mínimo, nos quais a largura de banda máxima que foi atingida foi de 4 Mbps, enquanto até aqui não excedia cerca de 1 Mbps. Nunca se registaram pacotes perdidos, mas o número de colisões aumentou comparativamente aos testes anteriores, atingindo como valor máximo 11%. Os tempos médios de serviço não aumentaram significativamente, sendo nitidamente inferiores aos anteriores. O facto do número de colisões ter aumentado advém do número muito superior de pacotes a competir pelo acesso ao meio.

4.7.4 Conclusões

O conjunto de condições descritas em termos de equipamento permitiram o estabelecimento de um contexto muito favorável à obtenção de bons resultados. De realçar, principalmente, dois aspectos: o comprimento do cabo e o número de nós.

O facto do cabo ter um comprimento menor reduz a probabilidade de ocorrerem transmissões simultâneas, ou por outras palavras, aumenta o grau de sucesso no acesso ao meio sem colisão.

O número de nós concorrentes aumenta a probabilidade referida anteriormente, mas, ainda mais importante para o desempenho, aumenta a probabilidade de dois ou mais nós estarem à espera do fim de uma transmissão para iniciarem a sua. Este factor condiciona significativamente o número de colisões, principalmente quando o tráfego é constituído por pacotes de grande tamanho.

O início de transmissão com probabilidade unitária quando o canal fica livre, terá sido a causa principal dos pacotes perdidos por excesso de colisões, que se verificaram com os pacotes de tamanho maior. De salientar que isto se registou para larguras de banda que não excediam 50% da capacidade total, e só com os pacotes de tamanho reduzido. Esta situação é nitidamente englobável no efeito de captura várias vezes abordado. No entanto, o mesmo já não aconteceu para larguras de banda superiores mas com pacotes de 1024 bytes, o que comprova a importância do tamanho dos pacotes.

Por outro lado, as estações utilizadas podem ser consideradas lentas quando comparadas com outras plataformas, mas a caracterização das mesmas também era um dos objectivos. Este facto que limitou a largura de banda absorvida, também é muito favorável para a rede, visto uma estação não poder num dado instante preencher toda a capacidade disponível.

Este facto, aliado às semelhanças de desempenho entre as diversas estações, em número reduzido, criou condições muito propícias ao estabelecimento de sincronização entre transmissões, o que permitiu atingir valores muito próximos do máximo possível. A existência de um elemento centralizador de informação e os pacotes de maior dimensão aumentaram a estabilidade desta situação.

Esta tendência para a sincronização evidenciada pela rede *ethernet* resulta do mecanismo de acesso ao meio e do algoritmo de retransmissão. Esta característica pode ser melhorada com uma conjugação favorável dos factores referidos, como aconteceu em alguns testes.

4.8 Limitações dos testes

Apesar de algumas limitações que são referidas resultarem dos objectivos enunciados, os pontos seguintes pretendem apontar as razões pelas quais os resultados não se podem generalizar. Efectuando uma análise crítica às condições de teste pode afirmar-se o seguinte:

- Os testes realizados não determinaram a influência de um conjunto de variáveis importantes, sendo de realçar o comprimento do cabo. Foi usada a instalação existente e não o caso mais desfavorável. De qualquer forma, é superior ao caso descrito no capítulo 6 que serviu de base aos testes.

- Os tempos obtidos resultam da soma de uma quantidade de parcelas não determinísticas. A decomposição destas torna-se assim complexa, e não permite

identificar a sua importância relativa. Concretamente, seria importante caracterizar com mais precisão a parcela relativa ao acesso ao meio.

- A situação anterior foi agravada pelo método utilizado, com envio de resposta, de modo a obter os tempos individuais de serviço.

- Não se considerou a camada de transporte, cujo papel desempenhado em assegurar fiabilidade na transmissão é fundamental.

- O número de nós foi reduzido. As limitações de material condicionaram significativamente os testes realizados. A possibilidade de criar vários processos emissores na mesma estação só aumenta a taxa de transmissão, não se traduzindo em verdadeira concorrência no acesso ao meio.

- O sistema operativo introduziu mais um factor de distorção nas medidas, acentuada pelas condições de carga, pelo que a obtenção de valores mais fiáveis implicou a utilização dos nós em condições de carga reduzida.

- Já é possível encontrar PCs com maiores níveis de desempenho, a baixo custo.

- As condições de tráfego simuladas tiveram sempre um carácter constante ao longo de cada teste. A avaliação da resposta da rede perante cargas pontuais, potencialmente elevadas, não foi experimentada. Contudo, a situação presente nas aplicações fabris é, regra geral, da existência de uma percentagem elevada de tráfego periódico.

- A falta de uma ferramenta de monitorização da rede revelou-se evidente.

- Assistiu-se à impossibilidade de variar independentemente a percentagem de largura de banda ocupada e o tamanho dos pacotes, em toda a escala.

4.9 Conclusões finais

Em primeiro lugar, é necessário afirmar que os resultados obtidos são fortemente dependentes das condições de teste, e que reflectem as influências de inúmeros factores não controláveis, como, por exemplo, os instantes de geração de tráfego de todos os nós. Para contrariar esta aleatoriedade verificada, procedeu-se a diversos testes de cada tipo, com alterações nas estações emissoras e receptoras, e com intervalos de tempo de duração muito variada.

De qualquer forma, as extrapolações de conclusões retiradas com base nestes resultados devem ser encaradas com precaução. O objectivo era experimentar uma situação concreta, com todos os factores envolvidos, na qual a rede não fosse isolada do contexto onde está inserida, no sentido de caracterizar as suas vantagens e limitações como um dos elementos de um sistema de comunicação.

A maior parte dos ensaios decorreu sob condições muito exigentes para a rede *ethernet* (e para o sistema operativo), que dificilmente serão transponíveis para qualquer tipo de aplicação. O carácter mais restrito (geograficamente) do tráfego, usualmente presente nas aplicações fabris, reforça esta afirmação.

No entanto, as aplicações são extremamente diversas, pelo que se tentou aumentar o grau de exigência e ter sempre como exemplo concreto o contexto descrito no capítulo 6. Relativamente a esta aplicação real, os níveis de tráfego foram aumentados em larga escala.

De qualquer forma, a utilização da rede *ethernet* para sistemas críticos não está em discussão. Para sistemas de tempo-real não críticos, se considerarmos que um pacote atrasado é equivalente a um pacote perdido, e se estabelecermos como referência um limite de 10 milisegundos para o tempo de serviço, para qualquer dimensão de pacote, conclui-se que a percentagem de pacotes perdidos é muito reduzida, inferior a 1%. Alguns comentários a esta afirmação:

- O tempo de serviço contabiliza o tempo de processamento do emissor, de duas transmissões e do processamento no receptor, sem carga em qualquer das estações, pelo que os 10 milisegundos são um majorante do tempo atribuído à rede para duas transmissões e para conseguir dois acessos ao meio.

- A dimensão do pacote não é muito relevante, pois verifica-se que o tempo de transmissão no pior caso é de 1,2 milisegundos. Deste modo, a parcela mais importante reside no tempo de acesso ao meio.

- Como já foi extensamente referido, alguns dos valores que superaram o limite imposto não são da responsabilidade da rede, mas sim do sistema operativo das estações.

Apesar de não se poder separar estes valores das condições em que foram obtidos, verifica-se que é possível atingir altos níveis de desempenho recorrendo à rede *ethernet*. Por outro lado, o conhecimento dos factores que influenciam este desempenho permite a utilização de configurações que o maximizam.

A percepção da ordem de grandeza dos valores envolvidos nas aplicações que utilizem plataformas de *hardware* semelhantes, e a contextualização da rede *ethernet*, foram outros dos objectivos atingidos.

Capítulo 5

Adaptação da rede *ethernet* ao tempo-real

5.1 Introdução

Apesar da ampla utilização da rede *ethernet* nos níveis superiores do sistema fabril, esta rede não satisfaz os requisitos exigidos aos níveis mais baixos. Os requisitos de comunicação dos vários níveis foram já apresentados no capítulo dois. O tempo-real surge, usualmente, como requisito fundamental das redes intercelulares e redes de campo caracterizadas no capítulo dois. Esta exigência imposta à comunicação resulta da tradução dos requisitos das aplicações que são executadas nos níveis inferiores do sistema de fabrico, nomeadamente os sistemas de controlo.

No entanto, existem aplicações que não impõem o requisito de tempo-real. No caso da comunicação de suporte de sistemas de controlo em que a perda de uma mensagem é suportável, há que tentar garantir, contudo, a estabilidade do sistema de comunicação, seja quais forem as condições que se verifiquem. Assegurar a estabilidade consiste em garantir que o meio de comunicação não satura. A rede *ethernet* revela algumas dificuldades em validar esta garantia sob cargas elevadas, como já foi extensamente referido.

No caso dos sistemas de controlo tempo-real não críticos, a utilização da rede *ethernet* pode ser equacionada. Os testes realizados no capítulo anterior e os estudos referidos identificaram os problemas inerentes à utilização da rede *ethernet* neste tipo de sistemas. É importante relembrar que, em comunicação tempo-real, uma mensagem atrasada equivale a uma mensagem perdida. Por outro lado, a possibilidade de perda de pacotes por excesso de colisões implica a existência de mecanismos que assegurem a fiabilidade da comunicação. A existência de políticas de retransmissão que assegurem a fiabilidade, se não garantirem um tempo máximo de transmissão, não são adequadas para sistemas tempo-real.

Em sistemas de controlo com exigências tempo-real críticas, o principal obstáculo à utilização da rede *ethernet* reside no facto do seu tempo de resposta não ser limitado. Este facto é agravado pela dispersão que os seus valores podem assumir, podendo mesmo verificar-se a perda de uma mensagem, como aconteceu durante os testes. Assim, esta proposta é preterida nestes sistemas de controlo, face aos seus concorrentes já referidos.

Numa perspectiva de integração, a análise das alternativas foi realizada no capítulo dois. Desta discussão resultou a opção pela utilização de redes locais. O facto de não ser possível estender a utilização da rede *ethernet* a todos os níveis dos sistemas de fabrico implica o recurso a *gateways*, que realizem a conversão entre os protocolos usados.

Outra alternativa é a de adaptação da rede *ethernet* de modo a suportar as exigências de comunicação tempo-real. Várias propostas neste sentido foram apresentadas no capítulo três. No entanto, a interligação destas propostas com a *ethernet* também implica o recurso a *gateways*. Estas propostas, além de permitirem manter o mesmo *software* de comunicações em todo o sistema fabril [Pritty, 95], têm como vantagem acrescida a flexibilidade de funcionamento. Esta flexibilidade está associada com o vasto conjunto de características que é possível obter.

O baixo custo do *hardware* associado à rede *ethernet* é outra justificação para o desenvolvimento de uma solução particular.

A análise das diversas propostas será realizada de modo a clarificar a sua aplicabilidade. Os problemas associados à sua implementação na plataforma de testes utilizada no capítulo quatro serão o foco deste capítulo. A avaliação do compromisso entre complexidade de desenvolvimento e melhorias conseguidas no comportamento da rede *ethernet* estará sempre presente durante a discussão.

A descrição do desenvolvimento de uma plataforma de teste que suporte várias das alternativas descritas, de modo a avaliar as suas vantagens comparativas para uma dada aplicação, é o objectivo final deste capítulo. Esta plataforma de teste pretende constituir uma base genérica que permita o estudo das propostas apresentadas e também o desenvolvimento de propostas que realizem controlo em malha fechada.

É realizada uma ligeira introdução aos aspectos envolvidos no desenvolvimento de algoritmos de controlo em malha fechada, em que a principal dificuldade consiste na avaliação do estado da rede.

5.2 Caracterização da plataforma de desenvolvimento

O desenvolvimento será efectuado sobre a mesma plataforma de *hardware* e *software* utilizada durante os testes. Concretamente, o sistema operativo Linux, o protocolo de comunicações TCP/IP e os controladores de rede NS8390. No entanto, apesar de serem focados os aspectos de implementação nesta plataforma em concreto, a análise tentará sempre referir características comuns ao desenvolvimento em qualquer plataforma.

Os desenvolvimentos efectuados estão necessariamente condicionados pela plataforma. Contudo, um dos objectivos primordiais é constituir uma base que seja facilmente transponível para outras plataformas. Deste modo, um dos requisitos consiste em que não haja necessidade de desenvolvimentos de *hardware*, para não criar um limite a este nível.

5.2.1 Sistema operativo

Desde logo, surge a questão da utilização de um sistema operativo não tempo-real. Só é possível atingir tempo-real no sistema de comunicação, se existir também um limite máximo para o intervalo destinado ao processamento do pacote por parte da interface de comunicação e do sistema operativo.

As razões que levaram à utilização do sistema operativo Linux já foram referidas e os objectivos concentram-se nas particularidades da rede *ethernet*, que não serão prejudicados por este facto.

No entanto, é de salientar que se assiste a desenvolvimentos neste sistema operativo, de modo a garantir tempos máximos de execução de tarefas, nomeadamente no atendimento de interrupções.

5.2.2 Controladores de rede

No sentido de encontrar uma solução, é preciso realizar a análise do funcionamento das placas de rede, concretamente do seu elemento fundamental: o controlador de rede.

As placas de rede usadas nos testes efectuados recorrem ao controlador 8390 da National Semiconductors, extensamente utilizado nas placas de rede de mais baixo custo.

Além deste controlador, foram analisadas outros dois, de modo a verificar se existem diferenças significativas ao nível das funcionalidades oferecidas. Isto resulta dos objectivos enunciados na tentativa que a solução preconizada seja facilmente transponível.

Os controladores analisados foram: o Intel 82595FX e o AMD 79c971. São duas propostas muito abrangentes, em que a primeira é proposta para barramentos ISA, e a segunda para barramentos PCI.

De facto, são três soluções muito semelhantes, que só diferem essencialmente em duas opções:

- O controlador NS8390 possui um registo de controlo que permite alterar o intervalo de tempo de *backoff*. Este intervalo é alargado apenas na resolução das três primeiras colisões, resultando num modo de funcionamento menos prioritário. O controlador proposto pela AMD também permite a alteração do algoritmo de *backoff*, que é programável.

- O controlador fabricado pela AMD oferece a possibilidade de inibição da retransmissão, após a ocorrência da primeira colisão.

Em tudo o resto, as funções oferecidas são similares. O algoritmo de *backoff* é intrínseco ao controlador, pelo que, a partir do momento que o pacote é copiado para o *buffer* do controlador, normalmente uma estrutura FIFO, este encarrega-se da sua transmissão, *backoff* aleatório e retransmissão, se necessário, até 16 vezes.

Todos os controladores possuem ainda um conjunto de registos onde são guardadas estatísticas acerca dos erros de transmissão e recepção, que podem ser acedidas pela interface (*device driver*) do sistema operativo.

A utilização da funcionalidade que altera o intervalo de *backoff* pode ser útil para criar classes de prioridade de tráfego. No entanto, a prioridade atribuída será sempre do tipo probabilístico.

A inibição de retransmissão após a primeira colisão revela-se fundamental para algumas das opções descritas, nomeadamente as de acesso aleatório (de partição por endereços e no tempo) descritas no capítulo três. Só com esta possibilidade é que é possível implementar métodos que efectuem a resolução de colisões de forma determinística.

No entanto, dado que estas possibilidades não se encontram disponíveis na totalidade dos controladores verificados, não foram consideradas; mas ficam aqui registadas uma vez que podem ser muito úteis para o desenvolvimento de outras propostas que não tenham requisitos em termos de generalização.

Só foram referidas as funcionalidades que distinguem estas três opções. Outras características de funcionamento serão tratadas posteriormente.

5.2.3 Conclusões

Só utilizando as funções disponíveis em todos os controladores, chega-se à conclusão de que a partir do momento em que o pacote é enviado para o controlador de rede, deixa de se poder controlar o instante do seu acesso ao meio e das eventuais retransmissões. Assim, se o objectivo consiste no suporte de tempo-real, é necessário garantir que a primeira tentativa de acesso ao meio tenha sucesso. O acesso exclusivo ao meio só é conseguido através das soluções que optam pelo acesso controlado.

A possibilidade de inibição forçada do controlador, monitorizando a sinalização de colisão, implicava alterações ao nível do *device driver* que comprometeriam a generalização. Por outro lado, não se pode esquecer que os tempos envolvidos são extremamente reduzidos, o que exigiria extremo cuidado para conseguir que o sistema operativo respondesse em todas as situações sem falhas. Este facto traduzir-se-ia numa redução do desempenho do sistema operativo que podia ser significativa, visto as modificações implicarem um aumento do código não reentrante.

O facto de existirem diferentes placas de rede recorrendo ao mesmo controlador, como as utilizadas durante os testes, não é relevante para esta discussão, pois é o elemento de controlo que condiciona as funcionalidades oferecidas ao sistema operativo.

5.3 Análise das diferentes propostas

A discussão realizada até este momento elimina as soluções baseadas nos métodos de acesso aleatório. Isto decorre do facto destas propostas não serem exequíveis com o recurso a qualquer dos controladores referidos, o que implicava o desenvolvimento de *hardware*.

O primeiro critério foi o de não exigir desenvolvimentos em termos de *hardware, o* que restringiu o conjunto de possibilidades a um número muito restrito. As propostas baseadas em métodos de acesso controlado ou acesso variável acabam por apresentar características semelhantes, pelo que a discussão, realizada segundos os critérios a seguir enunciados, é efectuada de modo global. Só são abordados separadamente os problemas de transição entre os dois modos de funcionamento dos métodos de acesso variável.

5.3.1 Critérios

Os critérios que determinam a opção final são a complexidade de implementação, o tempo de acesso, a eficiência, a robustez e a tolerância a falhas.

A complexidade da implementação condiciona os custos de desenvolvimento e, eventualmente, a possibilidade de estender a solução a outras plataformas.

O tempo de acesso pode ser caracterizado em valores médios ou máximos. Para um sistema de comunicação tempo-real é fundamental o tempo de acesso máximo.

A eficiência tem que ser avaliada sob dois pontos: o acréscimo do tempo de processamento e do *overhead* na comunicação. Dependendo da aplicação, ou por outras palavras, do ponto de estrangulamento, um destes pontos pode ser mais importante que o outro.

A robustez deriva do facto de não se pretender uma solução cujo equilíbrio seja instável, ou seja, tem que funcionar correctamente mesmo quando sujeita a perturbações.

A tolerância a falhas é importante pelo grau de dependência do sistema de fabrico relativamente ao funcionamento do meio de comunicação. Este critério extremamente importante só foi abordado sucintamente, devido à sua complexidade.

5.3.2 Métodos de acesso variável

Estas soluções resultam do compromisso entre a vantagem do tempo de serviço quase nulo, quando não se registam colisões sucessivas, o que sob carga reduzida é extremamente improvável, e dos altos valores para a eficiência dos métodos de acesso controlado sob cargas elevadas.

O problema desta abordagem prende-se com a transição entre estes dois modos de funcionamento. A alteração do funcionamento baseada na ocorrência de uma colisão não é exequível (só possível com o controlador AMD), como já foi descrito. Por outro lado, só as estações com mensagens envolvidas na colisão é que têm conhecimento acerca dela, pelo que a transição não seria efectuada pela totalidade das estações.

As outras hipóteses para efectuar a transição entre os dois modos são através do *broadcast* de um pacote de controlo [Venkatramani, 95], ou com a definição de intervalos de tempo em que fosse efectuado um acesso controlado.

A primeira hipótese tem como desvantagem o facto do pacote de controlo ter que competir com o restante tráfego, na transição para o modo controlado.

A segunda implica a existência de sincronização entre os nós, que pode ser atingida com a sincronização dos relógios ou através de uma ordem de transmissão pré-estabelecida. Outra hipótese para sincronizar os diversos nós é recorrer ao conceito presente em [Pritty, 95], em que uma estação monitor envia um impulso regularmente, de modo a delimitar os intervalos de acesso. Este impulso pode assumir a forma de uma pacote de controlo, apesar de ser menos eficiente. A desvantagem desta opção diz respeito à possibilidade de falha da estação monitor.

A sincronização de relógios num sistema distribuído é um assunto alvo de extensa bibliografia, com várias propostas adequadas às mais diversas situações.

5.3.3 Métodos de acesso controlado

A discussão acerca da sincronização entre os nós aplica-se inteiramente aos métodos de acesso permanentemente controlado.

A definição de intervalos de tempo em que o acesso é controlado pode também servir para suportar prioridades [Adelstein, 94], ou para efectuar uma reserva de transmissão [Chlamtac, 79]. A possibilidade de definir níveis de prioridade revela-se vantajosa em ambiente fabril, mas pode provocar que as mensagens menos prioritárias nunca sejam transmitidas; isto pode ser ultrapassado reservando sempre uma parcela de largura de banda para as classes menos prioritárias.

A desvantagem dos métodos de acesso controlado reside na sua pior eficiência com volumes de tráfego baixos, e no maior tempo médio de acesso ao meio. No fundo, as desvantagens das normas reguladas por testemunho: o *token-ring* e o *token-bus*.

Se existirem fontes de informação periódica num sistema de fabrico, o que normalmente acontece, por exemplo, com processos de monitorização que efectuam medidas periodicamente, porque não reservar previamente essa largura de banda, como no método proposto por [Yavatkar, 92]? Através de um algoritmo distribuído, cada fonte periódica tem sempre acesso exclusivo ao

meio. Uma das vantagens deste algoritmo é o facto de não necessitar de tráfego de controlo entre estações.

Além disso, esta proposta permite a existência de estações que executam o mecanismo CSMA/CD sem modificações para transmissões assíncronas, cuja prioridade é sempre inferior. Isto é conseguido pelo facto das estações periódicas não efectuarem *backoff*, o que implica alterações ao nível do *hardware*.

A possibilidade de coexistência de estações sem alterações implica sempre a existência de colisões, pelo que sem alterações de *hardware*, não se consegue atingir o tempo-real. No entanto, se até as fontes não periódicas executarem o mesmo algoritmo distribuído descrito em [Yavatkar, 92], também obtêm o conhecimento dos intervalos de transmissão não ocupados. A definição inicial dos intervalos deverá ser efectuada em regime de *setup*, ou mais uma vez através de intervalos de reserva pré-definidos.

Na maior parte das diversas questões que foram surgindo ao longo desta discussão poderiam ter sido adoptadas soluções centralizadas. Por outras palavras, o acesso ao meio podia ser controlado por uma estação monitora, que decidia e atribuía intervalos de tempo exclusivos a cada estação. O modo de funcionamento poderia basear-se num mecanismo de *polling*, ou de pedidos de transmissão para o elemento central. Estas foram preteridas na argumentação pelo facto de possuírem um ponto de falha único. Assim, o conjunto de propostas exequíveis ficou reduzido às propostas referenciadas nesta secção.

Verifica-se, assim que, dados os requisitos impostos, as hipóteses ficam muito limitadas, e são todas muito similares. As vantagens comparativas dependem então dos requisitos impostos pela aplicação.

5.3.4 Robustez dos métodos

Esta secção pretende focar os aspectos relacionados com a robustez dos métodos de acesso controlado.

Os mecanismos de controlo de acesso ao meio podem ser classificados, como efectuando controlo em malha aberta, isto é, sem realimentação.

Por outro lado, pode afirmar-se que a detecção de colisões e o mecanismo de retransmissão, intrínsecos desta rede, funciona como uma malha de realimentação do sistema. Esta malha não

está, regra geral, acessível para ser alterada nos controladores de rede disponíveis no mercado, visto as retransmissões serem processadas automaticamente, de acordo com a especificação da camada MAC. Dos três controladores de rede analisados, apenas um permitia a inibição da retransmissão em caso de colisão.

O facto do controlo ser efectuado em malha aberta traduz-se numa menor robustez. O problema desta abordagem consiste na possibilidade de haver alguma perturbação que provoque a ocorrência de uma colisão, o que compromete o funcionamento correcto do sistema de comunicação. A ocorrência de anomalias tem, por isso, que ser detectada. Por outras palavras, é preciso identificar as perturbações possíveis e tentar minimizar as suas consequências.

Os métodos que satisfazem os requisitos mencionados recorrem ao acesso controlado, que implica uma sincronização entre os nós. Assim, o principal problema reside na dessincronização entre os nós.

A sincronização, através da noção de um tempo global presente em cada nó, está amplamente estudada e documentada, mesmo com mecanismos de tolerância a falhas. O obstáculo que se pretende ultrapassar é o tempo de propagação do meio físico, que limita a qualidade da sincronização, ou por outras palavras, que condiciona o desvio mínimo possível entre estações.

A sincronização atingida por estabelecimento de uma ordem pré-determinada, fixa ou arbitrada periodicamente, cujo conceito é de um *token* implícito, não necessita de sincronização de relógios, e pode até admitir atrasos na transmissão, o que acontece necessariamente em sistemas operativos não tempo-real. No entanto, tem que prever, por exemplo, a falha de uma estação.

Caso uma estação possa abdicar do seu intervalo de transmissão, com o objectivo de aumentar a eficiência, podem ocorrer longos intervalos de tempo sem transmissão, o que implica a necessidade de sincronização de outro modo. As possibilidades são uma solução centralizada ou a sincronização de relógios. Qualquer destas opções resulta numa quantidade de tráfego mínimo.

Também neste caso, o método eleito pode resultar de um compromisso dependente da aplicação. Assim, se a especificação de tráfego previsto apontar para altos valores de utilização será privilegiada uma solução eficiente, em que a sincronização é realizada através do tráfego existente. Caso contrário, a opção por uma hipótese que introduza algum tráfego adicional não é problemática. Esta afirmação supõe como requisito inicial uma largura de banda constante e previamente estabelecida. Não faz sentido desperdiçar deliberadamente largura de banda provocando a necessidade de uma opção com maior capacidade e, necessariamente, mais cara.

5.3.5 Tempo de acesso

Os tempos de acesso médio e máximo são extremamente importantes para o desempenho dos sistemas e para os sistemas tempo-real, respectivamente.

Existem soluções que privilegiam o tempo de acesso face à largura de banda, nomeadamente. Como exemplo, se houver um período de arbítrio (em que se decidem as transmissões seguintes) após cada transmissão, em vez de várias, reduz-se o tempo de acesso das mensagens prioritárias, mas prejudica-se a eficiência. Se todas as mensagens possuírem a mesma prioridade, a existência de um período de arbítrio só faz sentido com o objectivo de reserva da próxima transmissão. Nestes casos, os tempos de acesso dependem do método utilizado, mas são menores, em média, em relação aos casos que o método de acesso ao meio é determinado de forma estática.

5.3.6 Implementação

A existência de períodos de arbítrio, após um número pré-determinado de transmissões, ou de transmissão por ordem pré-determinada, implica que cada estação tenha acesso a todo o tráfego na rede. A outra possibilidade seria a de transmissão de um testemunho explícito, solução menos eficiente a nível do meio de transmissão, visto ocupar largura de banda. A monitorização de todos os pacotes da rede, possível num meio *broadcast*, traduz-se num peso computacional acrescido. Por outro lado, esta solução permite aumentar a robustez, pois cada nó está constantemente a verificar se o algoritmo de acesso está a decorrer correctamente.

A captura de todos os pacotes é conseguida através de uma possibilidade disponibilizada em todos os controladores de rede encontrados, e que consiste no funcionamento dos mesmos no denominado modo promíscuo. A este respeito convém efectuar uma chamada de atenção para os problemas de segurança associados, que serão objecto de discussão posteriormente.

Neste modo, consegue-se, com algum processamento adicional, extrair dos pacotes todas as propriedades necessárias para o algoritmo de sincronização de transmissões, ou seja, o emissor e, eventualmente, um registo temporal (*timestamp*) e a prioridade do pacote.

Além da vantagem de ser uma solução genérica e sem restrições, soma-se ainda a facilidade de implementação desta solução, disponibilizada nas camadas superiores do protocolo de comunicações, no sistema operativo utilizado. Concretamente este modo de funcionamento pode

ser determinado através de uma opção disponível na camada de `sockets`, isto é, esta alteração não implica alterações a nível da interface com a placa de rede (*device driver*).

A maior desvantagem desta solução que copia todos os pacotes que percorrem a rede reside no peso computacional que acarreta, pelo que se este for um ponto crítico da aplicação, então a solução tem que assumir outras formas.

5.3.6.1 Segurança

O facto de uma aplicação poder facilmente obter todos os pacotes transmitidos, em que o seu formato é conhecido e em que os seus dados não são encriptados, constitui uma fragilidade evidente do sistema de comunicação. Por exemplo, monitorizando especificamente os portos utilizados pelos serviços `telnet` e `rlogin` do TCP/IP, pode facilmente obter-se as *passwords* dos utilizadores, visto mesmo estas não serem encriptadas. Existem, contudo, propostas que se propõem ultrapassar este problema, sendo o mecanismo de autenticação `kerberos` *5* um dos mais conhecidos e divulgados.

Como atenuante desta situação, é necessário referir que a criação do `socket`, ou a realização das alterações que permitem operar em modo promíscuo são de acesso reservado ao super-utilizador. Analogamente, o acesso a *raw sockets*, que permitem contactar directamente a camada dois do modelo OSI também é restringido ao super-utilizador. O acesso a *raw sockets* possibilita a construção de pacotes com permissão de acesso a informação, que de outra forma (sendo sujeitas às várias camadas da *stack* de comunicações) não era atingível.

Por outro lado, só é possível aceder aos pacotes que circulem no segmento de rede ao qual o nó que opera em modo promíscuo está ligado, limitando geograficamente o problema.

Como conclusão, pode afirmar-se que é algo complexo ter segredos e defesas não só relativamente ao administrador das máquinas onde se tem acesso, mas também relativamente a todos os administradores de máquinas do segmento de rede partilhado.

Nos sistemas fabris, este problema não se põe coloca com tanta gravidade, mas é importante esta chamada de atenção.

5.4 Controlo em malha fechada

Até aqui, a monitorização tem sido encarada como elemento fundamental da verificação do correcto funcionamento do sistema de acesso ao meio, concretamente do algoritmo de sincronização presente nas soluções de acesso controlado. Deste modo, pretende-se aumentar a robustez e criar uma base de desenvolvimento para métodos tolerantes a falhas. Noutra perspectiva, a monitorização pode ser vista como uma realimentação do sistema, ou seja, a aquisição do estado do sistema, elemento fundamental para o estabelecimento de uma malha de controlo fechada.

Com o objectivo de atingir a solução mais flexível possível, procurou conseguir-se captar o maior número de variáveis disponíveis. A solução encontrada consiste na captura de todos os pacotes que percorrem o meio físico, visto tratar-se de um meio partilhado. Desta forma, deixa-se em aberto a possibilidade de recurso a pacotes de controlo, o que também podia ser facilmente conseguido através do *broadcast* de mensagens.

A aquisição de dados adicionais acerca dos pacotes, sem alteração das aplicações que os enviam ou recebem, é outra das vantagens desta abordagem. Por exemplo, consegue obter-se facilmente o tamanho dos pacotes, o receptor e a aplicação que o gerou, ou por outras palavras as características do tráfego.

Tal como já foi referido nos estudos em que foram efectuados registos de utilização, existe uma correlação entre o tráfego actual e o imediatamente anterior, pelo que a solução preconizada também permite a exploração de técnicas pró-activas do género da referida em [Jacobson, 88a]: o *TCP header prediction*.

Além da possibilidade de obtenção das variáveis já referidas, através da captura de todos os pacotes transmitidos, ainda temos disponíveis dados acerca da interface com o meio físico como, por exemplo, o número de colisões, de retransmissões e de erros de transmissão e recepção. Os sistemas operativos registam normalmente um conjunto vasto de estatísticas a respeito das interfaces de comunicação, que podem ser acedidas com o comando Unix *netstat*. No entanto, no caso de uma das placas de rede (D-Link) usadas nos testes verificaram-se algumas anomalias na actualização das estatísticas já descritas no capítulo quatro.

5.4.1 Avaliação do estado da rede

Depois de conseguir obter a vasta panóplia de variáveis já descritas, interessava traduzir este conhecimento numa medida, ou medidas que quantificassem a carga a que a rede está sujeita, para posteriormente utilizar esse valor como entrada de um algoritmo de controlo.

Aqui surge a primeira dificuldade. Não existem valores absolutos e consensuais relativamente à quantidade de tráfego que a rede suporta, para um dado atraso requerido. Mesmo probabilisticamente, verifica-se que não existem regras bem estabelecidas entre utilização e atrasos registados, pois existem muitos outros factores de perturbação, como, por exemplo, as características do tráfego e a configuração da rede.

A utilização de regras heurísticas surge assim como alternativa viável, que podem ser mais incisivas se houver limitações ao nível dos atrás referidos factores de perturbação. Não é possível dissociar esta afirmação do âmbito no qual está enquadrada a solução apresentada: os sistemas de controlo tempo-real *soft*. Trata-se pois de tentar maximizar as probabilidades de cumprir *deadlines* de transmissão, no caso de utilização de regras heurísticas.

5.4.2 Conclusões

Esta é uma solução completamente distinta da implementação de técnicas que permitem o acesso exclusivo ao meio, conseguindo uma sincronização entre os diversos nós, como algumas das propostas apresentadas e que já seriam aceitáveis em sistemas de tempo-real *hard*. Neste caso, a monitorização do meio serve para garantir o correcto funcionamento da solução encontrada. Este conjunto de propostas tem como principal desvantagem a complexidade, e tem associados, em média, maiores tempos de acesso ao meio e desperdício de alguma largura de banda. No entanto, tornaram-se mais atractivos com o surgimento da taxa de transmissão de 100 Mbps, a preços competitivos.

Nos sistemas cujos requisitos de comunicação não assumem contornos de catástrofe caso as *deadlines* não sejam cumpridas, o objectivo primário é garantir que o meio de comunicação não satura e que não permite que tráfego prioritário seja colocado em fila de espera indefinidamente.

Para sistemas de tempo-real críticos, a solução passa por evitar a ocorrência de colisões, com o acesso ao meio realizado sempre de forma exclusiva como já foi referido. Ou então, o

estabelecimento de uma ordem pré-determinada para a resolução de eventuais colisões. Uma proposta semelhante à descrita por [Yavatkar, 92], em que a fonte de maior prioridade (periódica) continua a transmitir mesmo depois da colisão, não é viável com os controladores de rede analisados, pois o *backoff* é realizado de forma automática, não controlável.

5.5 Controlo de acesso

Seja qual for o método de controlo realizado, é necessário traduzir as suas acções no protocolo de comunicações, pelo que este tem que ser alterado. Por outras palavras, tem que ser desenvolvida uma forma de restringir o acesso à placa de rede, devido ao facto de não se conseguir controlar o processo a partir desse momento. Estas alterações, como as restantes, obedecem aos requisitos já mencionados, nomeadamente, serem facilmente generalizáveis a outras plataformas, não devendo por isso depender de particularidades de *hardware*.

O ponto do protocolo de comunicações onde esse controlo deve ser exercido tem que ser encontrado. Nas camadas superiores é constituído o formato do pacote, que pode ser subdividido em vários segmentos. Também interessa minimizar a latência entre a tomada de decisão e o seu efectivo cumprimento, pelo que as camadas inferiores são melhores sob estes dois aspectos. No entanto, tem-se como limite o momento em que o pacote é copiado para o *buffer* associado ao controlador de rede.

Outro dos factores que pesou na decisão foi a não modificação do protocolo escolhido, o TCP/IP. Isto decorre não só de ser um *standard de facto,* mas também de possíveis alterações poderem influenciar o seu desempenho. O TCP/IP possui vários mecanismos de controlo que foram sendo sucessivamente acrescentados com o intuito de corrigir algumas deficiências, e também como adaptação ao contexto sempre em mudança. Como exemplo pode referir-se o aumento da performance dos computadores. A descrição destes mecanismos pode ser encontrada em RFC 1323. Dada a complexidade dos mecanismos, que foi abordada sucintamente no capítulo quatro, seria necessário avaliar com cuidado as implicações das alterações realizadas.

Pelas razões descritas, as modificações foram realizadas nas rotinas de suporte dos *devices drivers* que são independentes do protocolo. Estas rotinas constituem uma interface comum para os protocolos de comunicação, e encapsulam as características de implementação dependente de *hardware*. Assim, modificando uma única rotina que serve de suporte às rotinas que copiam efectivamente os pacotes para o *buffer* do controlador de rede (que fazem parte do *device driver*), consegue atingir-se o objectivo em toda a plenitude.

Em termos de modelo OSI pode situar-se sobre a subcamada LLC *(Logical Link Control)*, ou seja, entre a camada ocupada pelo IP (camada de rede, que pode ser outra) e o *device driver*, pois a subcamada MAC é totalmente implementada em *hardware*. Esta argumentação foi baseada na implementação específica do sistema operativo Linux, e mais concretamente do TCP/IP na versão quatro. No entanto, a discussão pode ser extrapolada para outras implementações, dado que foi caracterizada em termos do modelo OSI e relativamente ao TCP/IP.

5.5.1 Implementação

Além dos requisitos que já foram mencionados acerca dos desenvolvimentos efectuados, pretendeu construir-se uma plataforma de teste flexível e independente do algoritmo de controlo, seja este um algoritmo em malha aberta ou fechada.

Dado que o protocolo de comunicações é intrínseco do núcleo do sistema operativo, as modificações a este nível têm que ser processadas com precaução. Por outro lado, a compilação do núcleo é uma tarefa demorada. Deste modo, interessava estabelecer uma linha de comunicação com o "exterior" de modo a transferir o desenvolvimento para o espaço reservado pelo sistema operativo aos utilizadores. É evidente que a correcção de erros das aplicações desenvolvidas vem extremamente facilitada. Neste aspecto, revelaram-se extremamente importantes duas características do sistema operativo Linux: a sua estrutura modular e o *kerneld*.

A estrutura modular permite inserir e retirar módulos pertencentes ao núcleo na linha de comando, ou criar dependências que possibilitam a execução destas tarefas de forma transparente para os utilizadores, através de um *daemon*: o *kerneld*.

Apesar de não existir um módulo que contenha o protocolo de comunicações, podem realizar-se experiências recorrendo a módulos auxiliares, que emulem as funcionalidades pretendidas, com todas as vantagens já referidas. O *kerneld* é um *daemon* que estabelece uma fila de mensagens entre o núcleo e os processos do utilizador, tendo sido desenvolvido para responder às solitações do núcleo em termos de módulos necessários. As aplicações utilizaram esta fila de mensagens bidireccional já desenvolvida, sendo o *kerneld* substituído por outro *daemon* desenvolvido para o efeito.

Desta forma, temos um canal de comunicação estabelecido entre o núcleo e o espaço reservado ao utilizador, perfeitamente genérico.

5.6 Conclusões

Este capítulo pretendeu focar os aspectos relacionados com a implementação das propostas de adaptação da rede *ethernet* ao tempo-real.

Estas propostas, que foram apresentadas no capítulo três, pretendem estender a utilização da rede *ethernet* aos níveis inferiores do sistema fabril, onde o tempo-real surge, regra geral, como requisito.

Além disso, mesmo que o tempo-real não seja uma exigência, seria importante conseguir melhorar a estabilidade da rede *ethernet*. É nesta perspectiva que surge o controlo em malha fechada. O estudo desta possibilidade é muito complexo, pelo que se pretendeu enunciar os problemas envolvidos.

A constituição de uma plataforma de suporte ao desenvolvimento deste assunto, mas que permite também o estudo das propostas já referidas, foi realizada e é descrita neste capítulo. O estudo das propostas pretende aprofundar os aspectos relacionados com a robustez e tolerância a falhas. Estes aspectos foram alvo de uma abordagem sucinta.

Foi desenvolvido um canal de comunicação entre o núcleo do sistema e os processos do utilizador. Este canal de comunicação em conjugação com o processo que capta todos os pacotes do meio físico e com as estatísticas já referidas do sistema operativo, constituem uma plataforma de teste perfeitamente genérica, muito flexível e independente do *hardware* utilizado, preenchendo todos os requisitos pretendidos.

Capítulo 6

Um caso prático

6.1 Introdução

Este capítulo pretende descrever uma empresa de um sector muito representativo do tecido industrial nacional: o sector das confecções. Os aspectos envolvidos num projecto de desenvolvimento de aplicações que permitam melhorar a competitividade serão abordados.

Para este estudo são principalmente relevantes os aspectos relacionados com o projecto da rede. A análise dos requisitos de comunicação exigidos pelas aplicações que se pretendem implementar e a sua tradução em requisitos de transmissão de dados serão o foco principal da descrição.

Os testes descritos no capítulo quatro decorreram, em grande parte, da avaliação da aplicabilidade da rede *ethernet* neste caso concreto. Apesar dos requisitos impostos à comunicação não serem muito exigentes em termos de tempo de resposta e não envolverem aspectos críticos, o conjunto de testes realizados permitem defender esta solução de forma mais segura.

As lições retiradas dos testes e dos estudos referenciados possibilitam a maximização do desempenho da configuração final.

Este caso serve ainda como exemplo do papel importante que a rede *ethernet* pode desempenhar na integração de sistemas de fabrico, nomeadamente nos sistemas em que o tempo de resposta não é crítico.

6.2 Contexto actual

Nos últimos anos o panorama das indústrias portuguesas produtoras de vestuário alterou-se radicalmente, com consequências na diminuição da produção, retracção no investimento, redução no número de unidades industriais e perda de postos de trabalho. A recessão nos mercados europeus após 1992, a conclusão do Mercado Único e o fim das negociações do GATT, com a crescente globalização da economia e deslocamento da produção para países com estruturas salariais mais atractivas, nomeadamente na Ásia e Leste europeu contribuíram de forma marcante para a evolução negativa deste sector da indústria portuguesa. Outro factor relevante prende-se com a não adequação da maioria das empresas portuguesas aos novos requisitos do mercado. A deficiente estrutura financeira ou o crescente estado de descapitalização, a ausência de controlo sobre os canais de distribuição, factores de competitividade assentes em baixos custos de mão-de-obra e a pouca importância dada, até agora, à qualidade, imagem, *design* e serviço ao cliente, são alguns dos factores da envolvente interna que mais contribuíram para a fragilização da posição da indústria portuguesa.

Espera-se que a tendência de deslocamento da produção para países exteriores à União Europeia aumente, durante a presente década, já que para além de custos competitivos estes países têm melhorado consideravelmente os seus padrões de qualidade e serviço para os níveis exigidos pelos consumidores europeus.

6.3 A empresa

A empresa produz vestuário interior de senhora e fatos de banho para os segmentos alto e topo de gama maioritariamente para o mercado europeu. O produto é muito influenciado pela moda, o que se traduz em:

- Elevada sazonalidade.
- Grande variedade e complexidade.
- Ordens de fabrico muito fragmentadas e de pequenas quantidades.
- Rigor absoluto relativamente a prazos de entrega.
- Necessidade de tempos de resposta muito curtos.

Estes factores, se por um lado implicam um agravamento de complexidade na sua produção em processo industrial, por outro, restringem grandemente o número de produtores habilitados, nomeadamente em relação a países asiáticos e do leste europeu. O custo é um factor importante mas não determinante.

A empresa está integrada num grupo multinacional, cuja sede efectua o desenvolvimento dos produtos, o controlo de qualidade de matérias primas e a comercialização dos produtos finais.

O papel desempenhado por esta unidade no contexto do grupo multinacional é o de uma unidade com constante de tempo reduzida, pelo que o tempo exigido para o cumprimento das ordens de fabrico enviadas pela sede, normalmente de pequeno volume, é de poucos dias.

6.4 Fluxo produtivo

No diagrama a seguir apresentado é visível o percurso dos produtos ao longo de todo o processo produtivo (fig. 6.1).

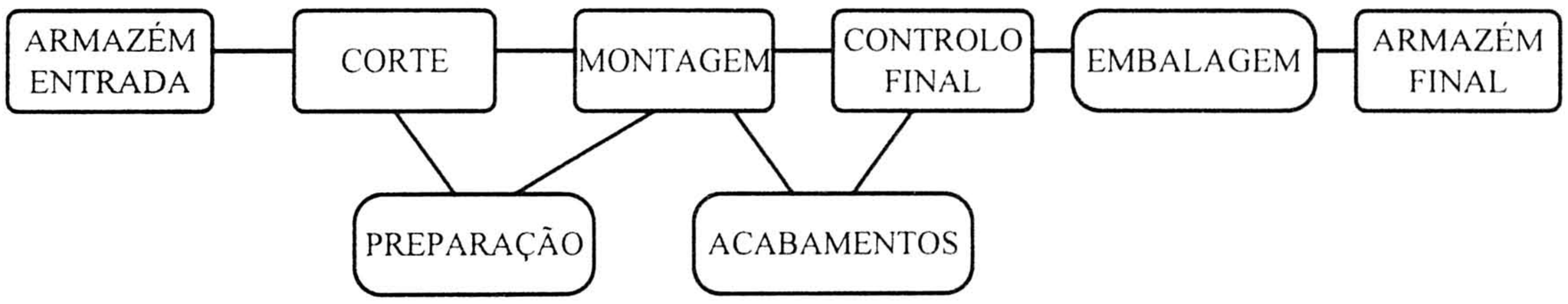


Fig. 6.1 - Fluxo Produtivo

O transporte entre as diversas divisões é efectuado manualmente. Isto é possível devido ao facto dos produtos serem leves. A chegada das matérias primas é acordada com a sede que efectua o controlo de qualidade das mesmas.

6.4.1 Armazém

Aqui é feita a armazenagem de matérias primas. O *stock* é mantido no mínimo possível (um a dois dias).

O armazém mantém uma base de dados com toda a informação necessária sobre todas as matérias primas.

6.4.2 Corte

A divisão de corte é responsável pelo corte das diferentes peças que constituem o produto final. Devido ao facto desta operação ser crítica em termos de qualidade do produto final, o controlo de qualidade é efectuado durante todas as operações de corte.

Esta operação é realizada tendo como um dos objectivos a minimização de desperdícios de matérias primas com auxílio computorizado.

As diversas peças que posteriormente serão agregadas, devem ser cortadas a partir da mesma peça de tecido, por questões de uniformidade do produto final. São então enviadas para as várias linhas de montagem, ou podem passar primeiramente por uma fase de preparação, geralmente subcontratada. A preparação consiste, por exemplo, num bordado.

6.4.3 Montagem

Esta secção efectua a junção das diferentes peças provenientes da secção de corte. Tem adstrita 70 a 80% dos recursos humanos, pois são realizadas várias operações que necessitam de mão de obra intensiva.

Está estruturada em sete linhas manuais, representadas na figura 6.2, que fabricam, num dado instante, só um tipo de produto, mas pode haver variações no modelo (por exemplo, vários tamanhos) pelo que são classificadas como multi-modelo. Acresce a este facto a possibilidade de fabricarem outros produtos, mas estes nunca coexistem nos postos de trabalho.

Cada linha tem entre dez a vinte operárias, e uma chefe de linha que supervisiona a linha e transporta os produtos entre postos de trabalho. A supervisão consiste, essencialmente, na verificação de anomalias no nível de *stocks* intermédios e no controlo de qualidade local. É também responsável pela distribuição do trabalho na linha, em conjunto com o gabinete técnico, uma vez que ao lidar directamente com as operárias, conhece melhor as suas capacidades.

Os postos de trabalho são constituídos por uma ou mais máquinas de costura *standard*, e uma operária. A chefe de linha é responsável pela colocação dos acessórios e matérias-primas necessários às diferentes operações nos postos de trabalho respectivos.

Após a montagem dos produtos estes poderão sofrer uma fase de acabamentos, também normalmente subcontratada, ou passar directamente à fase de controlo de qualidade final.

- comprimento total máximo de cada linha é de cerca de 20 metros.

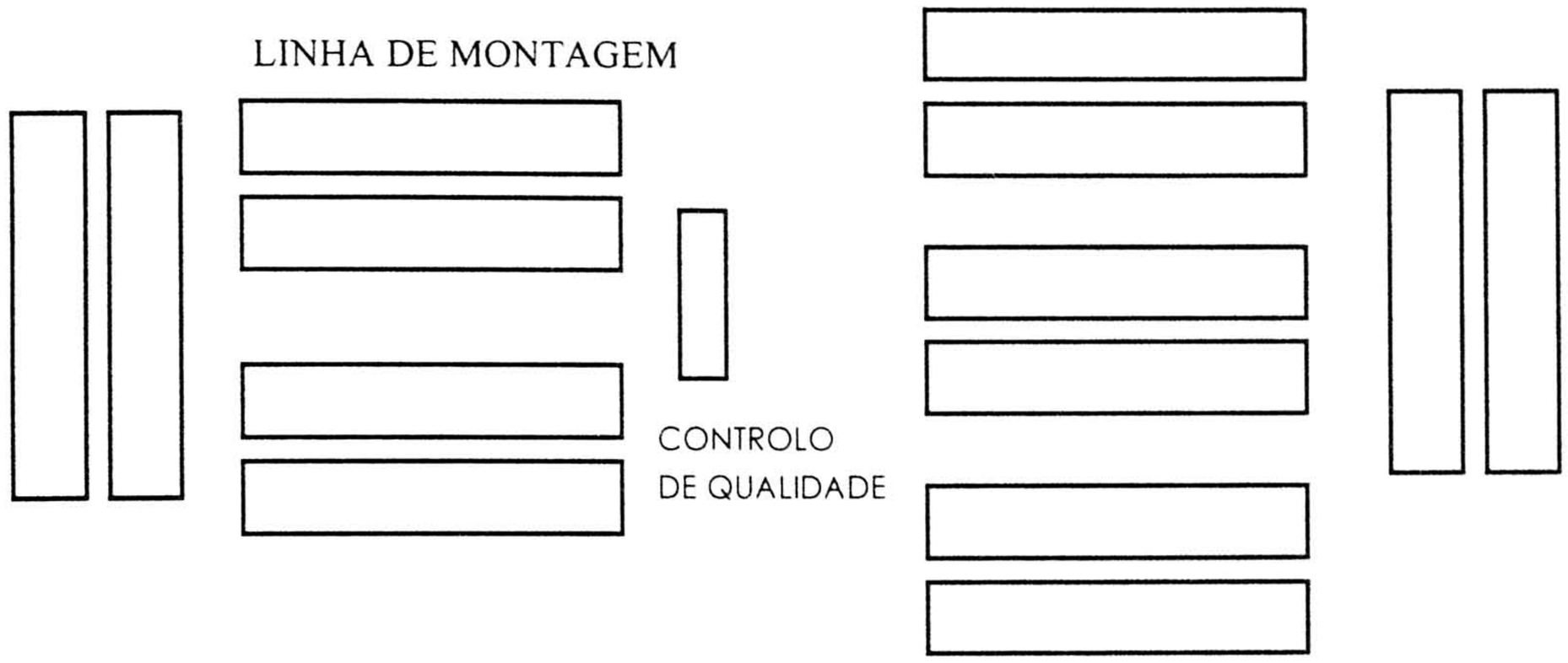


Fig. 6.2 - *Layout* da secção de montagem

6.4.4 Controlo final

Após a montagem, é feito nesta secção o controlo final dos produtos, por inspecção visual, sendo este controlo realizado em 100% dos produtos, uma vez que se pretende abastecer um segmento de mercado de topo.

Alguns produtos são experimentados em manequins ou, em alguns casos, em pessoas. Este tipo de controlo é feito por amostragem.

6.4.5 Embalagem

Nesta secção realizam-se as operações de passagem a ferro, e embalagem individual no caso de produtos acabados. Então, os produtos acabados são armazenados no armazém final.

6.4.6 Manutenção

Esta divisão, não mencionada no fluxo produtivo, tem como função a manutenção dos equipamentos, a substituição desses equipamentos quando necessário e a execução dos novos *layouts* quando assim determinado. Existe um parque de máquinas, não utilizado usualmente,

que visa suprir as dificuldades que surgem. Os encargos financeiros decorrentes desta solução não são relevantes, pois trata-se de máquinas de costura *standard*. Por outro lado, são muito robustas pois são dimensionadas para a costura de artigos mais fortes. A manutenção é totalmente correctiva, não existindo manutenção escalonada ou predictiva.

6.5 Planeamento e Gestão da produção

Esta função é assegurada pelo gabinete técnico, com o auxílio das chefes de linha, e consiste fundamentalmente em duas tarefas:

- ▷ Planeamento da produção.
- ▷ Balanceamento das linhas.

Dado que o desenvolvimento dos produtos é efectuado na sede do grupo, as informações acerca destes são enviadas conjuntamente com as ordens de fabrico. Assim, este sector também tem que efectuar o seguinte:

- ▷ Análise dos dados técnicos provenientes da sede.
- ▷ Verificação desses dados.
- ▷ Adaptação do processo operatório ao *layout* e aos operários.
- ▷ Estudo de modificações do *layout* em casos pontuais.
- ▷ Apoio técnico relativo às operações necessárias.

Para cada produto, esta secção testa os tempos operatórios que constam dos dados técnicos enviados pela sede, e verifica qual a melhor abordagem para cada uma das diversas operações.

6.5.1 Planeamento e balanceamento

O gabinete técnico efectua o escalonamento das várias ordens de fabrico, que contêm o número total de peças, número este que pode ser dividido em vários lotes. Devido ao facto de serem produtos sujeitos a fenómenos de moda, não é realizada produção para *stock*, tendo sido adoptada uma filosofia de *Just-In-Time*.

O gabinete técnico adapta então o processo produtivo à linha ou linhas escolhidas para o efeito, que podem sofrer alterações a nível de postos de trabalho e/ou de operárias. Esta operação consiste no escalonamento das operações pelos diferentes postos de trabalho, de modo a atingir um correcto balanceamento da linha.

Com o auxílio das chefes de linha, e através da informação histórica dos tempos de realização dessas mesmas operações por parte de cada operária, estas são distribuídas pelos diferentes postos de trabalho.

O gabinete técnico ainda tem como funções a recolha e análise dos tempos realizados por cada operária nas diferentes operações, bem como o registo das perdas que eventualmente ocorram.

Os lotes em média rondam as 200 a 300 unidades, o que é provocado pelas tendências de diferenciação e diversificação do mercado, número este que tem vindo a diminuir gradualmente.

6.5.2 Previsão de rendimentos

Para assegurar tempos de resposta curtos, é importante ter um conhecimento pormenorizado da capacidade efectiva da produção, concretamente ao nível da secção de montagem.

A tarefa mais complexa do planeamento e gestão da produção consiste na previsão dos rendimentos de cada linha, ao longo do ciclo produtivo de um lote. O modelo seguido é extrapolado das curvas de aprendizagem que geralmente se encontram associadas a cada operação. Assim, é encontrada uma curva de aprendizagem global para a linha, correspondendo a um lote de um determinado produto.

Os rendimentos e a constante de tempo são estimados tendo em conta os valores históricos, a complexidade do produto em questão e as características da linha e das suas operárias.

Este modelo revela-se extremamente fiável, para o que contribui o largo intervalo de tempo em que vem sendo aplicado.

A correlação entre as curvas reais e teóricas é bastante boa, a não ser nas zonas de transição para um produto diferente, em que os pressupostos do modelo adoptado não são aplicáveis. Por exemplo, o modelo assume que o equilíbrio da linha é estável, não existindo rupturas de *stocks* intermédios, o que se verifica aquando da mudança de produto.

6.6 Controlo da Produção

Cada operária tem de preencher uma ficha diária, onde indica quantas peças fez, em quatro períodos do dia, e as causas de paragens, se ocorrerem.

O registo da produção diária de cada linha é realizado posteriormente. Este processo não permite obter o conhecimento do estado da produção em tempo útil, pelo que serve essencialmente para conhecimento do processo e para processamento relacionado com a contabilidade.

Na ficha diária preenchida pelas operárias, são registadas também as perdas que existiram durante a execução de uma determinada ordem de fabrico. Estas perdas são, no caso geral, devidas a:

- Falha de abastecimento de matérias-primas.
- Avaria de equipamento.
- Absentismo.
- Falhas de energia.

A monitorização da produção é assim assegurada quase exclusivamente pelas chefes de linha. Assim, o desempenho da chefe de linha condiciona significativamente a produtividade de uma dada linha. O tamanho dos produtos não torna facilmente detectável a existência de *stocks* intermédios de volume elevado.

6.7 Motivação do projecto

A competitividade de indústrias baseadas na exploração de mão-de-obra barata, já não é viável em Portugal, no contexto actual, pois não é possível competir com os salários pagos em outros países, nomeadamente onde estão situados os outros centros produtivos do grupo.

Então, uma alternativa possível é a produção de produtos de valor acrescentado, o que já acontece actualmente com a produção de produtos de gama alta. Como grandes linhas de acção, consensualmente aceites nos vários estudos publicados e entre os analistas económicos, há que apostar na qualidade e na rapidez de resposta.

Pode concluir-se que uma das principais lacunas do sistema produtivo consiste na inexistência de um sistema de monitorização da produção em tempo-real, que permita, quer às chefes de linha, quer ao planeamento e controlo da produção, a detecção atempada de problemas; mais concretamente, a acumulação ou ruptura de *stocks* intermédios. Actualmente, a recuperação de uma situação anómala é bastante demorada e acarreta prejuízos elevados.

Outros dos benefícios desta opção seriam a diminuição da dependência da performance das chefes de linha para atingir elevados níveis de produtividade, e o aumento da rastreabilidade dos produtos. Por outro lado, o desenvolvimento de ferramentas de apoio à produção que permitam auxiliar o gabinete técnico nas suas funções é importante, dada a complexidade já descrita das suas tarefas.

É de referir que esta abordagem se centra essencialmente na secção de montagem, pelo elevado número de pessoas que contém e porque residem lá os principais problemas de gestão e tomadas de decisão.

Uma das lacunas encontradas a nível das ferramentas computacionais existentes no mercado é a falta de interligação entre as aplicações de apoio aos agentes de decisão. Assim, um dos requisitos iniciais do sistema que se pretende desenvolver é a integração de todas as aplicações desenvolvidas. Este facto traduz-se na necessidade de comunicação eficiente entre todos os elementos do fluxo produtivo e níveis de decisão.

6.8 Descrição do projecto

No sentido de manter e melhorar as vantagens competitivas actuais, foi iniciado um processo que visa intervir nos principais sectores produtivos de forma a melhorar os resultados em:

- Produtividade.
- Flexibilidade.
- Qualidade.
- Tempo de resposta.

A introdução de uma ferramenta de apoio à decisão tem como objectivo melhorar a produtividade da empresa através de ganhos em eficiência e redução de perdas acidentais; melhorar o serviço prestado a clientes com a redução de tempos de trânsito e maior precisão em

prazos de entrega; libertar os quadros técnicos de actividades manuais de gestão da informação e controlo de produção, para actividades na área da qualidade e melhoria dos processos produtivos.

As principais áreas de intervenção serão a nível de:

- ▷ planeamento agregado da produção.
- ▷ balanceamento das linhas de montagem.
- ▷ simulação.
- ▷ monitorização e controlo.
- ▷ estruturação da informação.

6.8.1 Planeamento agregado da produção

É a este nível que são geradas algumas das mais importantes perdas para a empresa. A incorrecta distribuição das ordens de fabrico pela capacidade produtiva existente traduz-se, normalmente, em perdas de rendimento provocadas pelas curvas de aprendizagem e tempos de *setup*. A incorrecta avaliação e controlo de recursos de fabrico impõe em muitos casos *stocks* intermédios elevados, com consequências a nível de custos e tempos de trânsito. A ocorrência de rupturas nos stocks intermédios traduz-se em perdas irreversíveis. A complexidade da tarefa e o não número extenso de variáveis envolvidas aumentam a inércia do sistema, com redução da flexibilidade da empresa.

Pretende-se, essencialmente, neste módulo analisar globalmente a empresa, a sua capacidade produtiva, e sugerir datas de início de produção das diferentes Ordens de Fabrico, de modo a rentabilizar a sua produção. Serão consideradas como condições fronteira a disponibilidade dos recursos de fabrico e datas de entrega necessárias.

A ligação ao módulo de monitorização e controlo permitirá uma actualização permanente do planeamento e ainda avaliar a diferença entre o desempenho corrente e o esperado do sistema.

Na fase de projecto será necessário identificar os requisitos de informação, nomeadamente em termos de estimar a capacidade de cada secção, parâmetros das ordens de fabrico, caracterização detalhada dos produtos e recursos envolvidos. A nível de dados de entrada, é necessário possuir diagramas de sequência de operações/recursos envolvidos e de constituição/matérias-primas para

cada produto, o que permitirá ao longo do processo fazer verificações em termos de utilização de recursos e necessidades de matéria primas.

6.8.2 Balanceamento das linhas de montagem

A secção mais crítica é a montagem dada a concentração de cerca de 70 a 80% dos recursos humanos. Se, através de um correcto planeamento, se podem estabelecer condições para o melhor desempenho desta secção, só através de balanceamentos optimizados para as várias linhas de montagem se podem garantir melhorias significativas de rendimento, redução de perdas eventuais, redução de *stocks* intermédios e minimização de tempos de trânsito.

Actualmente, o escalonamento nesta secção é realizado pelas chefes de linha e gabinete técnico, resultado do conhecimento adquirido ao longo do tempo e de dados históricos recolhidos.

Os factores relacionados com o produto tais como a variabilidade, complexidade e a fragmentação das ordens de fabrico, aliados a um grau de irregularidade imposto pela forte presença do factor humano nesta secção, aumentam sobremaneira a dificuldade de estabelecimento de soluções optimizadas.

O balanceamento engloba a definição dos postos de trabalho, e a distribuição das operárias por esses postos, tendo em conta os índices de desempenho destas em relação às operações que irão ter que efectuar e as suas curvas de aprendizagem. Os índices de desempenho reflectem o rendimento, os níveis de absentismo, a predisposição à realização de determinada operação e a configuração final do posto de trabalho. Estes índices são obtidos a partir de dados históricos e do conhecimento que as chefes de linha detêm sobre cada operária.

A complexidade desta secção reside no facto do número de variáveis ser extenso e na extrema flexibilidade do *layout* dada a simplicidade em alterar a topologia dos postos de trabalho e os próprios postos. Variáveis a ter em consideração são os índices das operárias face às operações, as curvas de aprendizagem, os tempos de realização das operações, o número de máquinas por posto de trabalho, o número de operações por posto de trabalho, o tempo de trânsito das peças, e os níveis máximo e mínimo de *stocks* intermédios.

6.8.3 Simulação

Em sistemas complexos e nos quais a colocação em prática de soluções pouco eficientes se pode revelar demasiado dispendiosa torna-se vantajoso o recurso à simulação.

Se, nos módulos descritos anteriormente, se pretende encontrar e avaliar soluções iniciais a partir de modelos pré-definidos, a utilização da simulação da actividade fabril tem como objectivo fazer a verificação detalhada no tempo das soluções encontradas, analisar cenários alternativos e avaliar os resultados esperados.

Em termos de planeamento agregado pretende avaliar-se a distribuição da capacidade das secções, o comportamento dos *stocks* intermédios, o fluxo de trabalho e a utilização de recursos no tempo. O módulo de simulação tem como objectivo permitir ao operador testar vários cenários possíveis, fornecendo-lhe, para cada solução possível, informação quantitativa e qualitativa, com o objectivo de facilitar o processo de decisão. Outro dos objectivos consiste no teste da sensibilidade das soluções face a perturbações e avaliá-las sob o ponto de vista da utilização de recursos no tempo.

No entanto, onde a simulação se irá revelar mais vantajosa será na montagem, pelas características já citadas. A este nível pretende testar-se as configurações dos postos de trabalho, analisar a sensibilidade do balanceamento a perturbações do rendimento e ao absentismo não programado, avaliar possíveis irregularidades de *stocks* entre postos de trabalho e analisar o comportamento das linhas durante os períodos de transição.

Além disso, a interligação entre a monitorização e a simulação tem como objectivo adicional o levantamento da configuração implementada e a avaliação da sua evolução, o que pode ser importante na detecção antecipada das anomalias e correcção das mesmas, permitindo o funcionamento proactivo do sistema.

6.8.4 Organização da informação

Todos os módulos citados necessitam de aceder a uma grande quantidade de informação, pelo que a organização da mesma é um passo determinante no funcionamento eficaz de todo o sistema. A estruturação de uma base de dados que congregue os diferentes módulos de informação e que permita a troca de dados entre eles, afigura-se como uma tarefa imprescindível. Os módulos pretendem congregar informação relativa aos seguintes elementos:

- ▷ Recursos Humanos
- ▷ Equipamentos
- ▷ Matérias-primas e semi-trabalhados
- ▷ Operações
- ▷ Produtos

6.8.5 Monitorização e Controlo

A obtenção de informação fiável quanto aos tempos de produção torna-se indispensável com vista à organização de dados históricos necessários ao planeamento e escalonamento da produção. Por outro lado, o seu acompanhamento em tempo-real permitirá detectar mais rapidamente o aparecimento de problemas, tornando-se possível reagir antes que se possam propagar a outros sectores. A redução da carga burocrática actual, com menor influência subjectiva inerente à obtenção desses dados a partir dos recursos humanos, são ainda algumas das vantagens deste sistema.

O registo dos tempos por operação, tempos de espera em *buffers* intermédios, níveis de stocks, absentismo e quebras de rendimento, permitirão obter registos históricos e tomar medidas correctivas. Por outro lado, o facto de facilitar a rastreabilidade do produto é extremamente importante para a detecção das causas de defeitos na qualidade.

A inclusão de um sistema de mensagens de erro direccionadas aos responsáveis das diversas áreas fabris, graduadas em níveis da gravidade do erro detectado, também pode assumir um papel importante na acção proactiva do sistema.

Outra medida a ser tomada com base na informação recolhida será a sinalização para as operárias do nível de stocks imediatamente anterior e posterior ao seu posto de trabalho.

O projecto prevê a disponibilização de informação *on-line* para a chefe de linha, que assim poderá observar, através de uma interface gráfica, o evoluir dos lotes ao longo da linha, com sinalização dos rendimentos que estão a ser obtidos nos diferentes postos de trabalho, dos níveis de stocks e avarias ou anomalias que possam surgir no decorrer da actividade.

A aquisição deste sistema seria difícil de justificar economicamente, só pela constituição automática de uma base de dados com informação histórica sobre o processo, já que tal é actualmente possível, embora de forma não automática (implicando o processamento manual de todas as folhas de rendimentos das operárias).

No entanto, a maior vantagem será a aquisição tempo-real do estado da secção de montagem, permitindo combater mais atempadamente a ruptura ou acumulação de *stocks* intermédios.

A nível da obtenção de dados o objectivo do sistema proposto é obter todos os dados que actualmente são analisados, e permitir a obtenção de um volume de dados adicional que poderá ser útil e que pode ser processado automaticamente.

6.8.5.1 Sistema de Identificação Fabril

Este sistema é uma peça fundamental do sistema de monitorização e visa identificar o produto ao longo de todo o processamento.

Dada a natureza dos produtos, a nossa opção recai por identificação com códigos de barras. Esta é uma opção barata, cuja limitação em capacidade de armazenamento não constitui uma restrição neste contexto. Acresce o facto de se tratar um ambiente limpo, sendo a opção mais utilizada nas indústrias do sector, nos nossos dias.

O problema desta solução reside nos curtos tempos de processamento de das operações efectuadas, que oscilam geralmente entre 10 e 120 segundos. O tempo de identificação individual de cada produto seria, assim, relevante para o tempo total de produção de cada peça.

6.9 Comentários finais ao projecto

O principal vector de inovação deste projecto consiste na integração de todos os módulos constituintes, já descritos, e cuja sinergia tem como objectivo atingir proveitos significativos.

Apesar de existirem alguns sistemas similares no mercado correspondendo aos módulos de planeamento e monitorização, que pecam, regra geral, pela falta de integração, verifica-se uma lacuna relativamente a sistemas que permitam realizar o balanceamento de linhas de produção com as características descritas.

Como suporte aos vários módulos torna-se imperioso a inclusão de uma base de dados que permita organizar toda a informação necessária.

A nível do planeamento, as principais subtarefas são a distribuição das ordens de fabrico pelas linhas, tendo em conta regras de correlação produto/linha, a análise das capacidades de todas as secções e verificação da disponibilidade dos recursos fabris (equipamentos, matérias-primas e recursos humanos). Este processo pode sofrer várias iterações de modo a encontrar uma solução próxima da óptima sob o ponto de vista de várias regras pré-definidas, por exemplo, minimização das datas de entrega. A solução obtida poderá ser posteriormente adaptada com os dados monitorizados ou com situações não previstas inicialmente.

O balanceamento das linhas de produção da montagem terá que estabelecer a configuração dos postos de trabalho, atribuir as operárias aos mesmos e comunicar de forma estreita com o planeamento. Neste módulo assume extrema importância a tradução do conhecimento experimental das chefes de linha e dos agentes de métodos e tempos, adquirido ao longo do tempo acerca das operárias, com o recurso a ferramentas de inteligência artificial.

A simulação pretende testar os resultados obtidos no planeamento, no balanceamento e analisar a sua sensibilidade a distúrbios.

A monitorização tem como objectivo primeiro a recolha de informação nas várias secções, com maior relevância na secção de montagem, na qual esta recolha é efectuada em cada posto de trabalho. O seu desempenho condiciona fortemente a eficácia das acções de controlo a efectuar, e a sua interligação com os módulos de planeamento e balanceamento permitirá afinar as soluções obtidas inicialmente.

6.10 Projecto da rede de comunicação

A instalação de uma ou várias redes de comunicação entre os computadores já existentes e os que irão necessariamente ser adquiridos, permitirá a acessibilidade dos dados nos vários centros de decisão e a troca de informação entre eles, e resulta dos requisitos de comunicação impostos pelas aplicações referidas. Trata-se de uma peça fundamental da integração subjacente a este projecto.

A importância de tomar as decisões mais acertadas num dado instante implica o conhecimento preciso do estado actual de toda a empresa, nomeadamente da produção. Principalmente, neste caso particular, em que o tempo de resposta se assume como uma das mais valias. Com este

objectivo em vista, é necessária a comunicação entre os diversos níveis já identificados deste sistema de fabrico.

As exigências temporais impostas neste tipo de indústria vêm normalmente suavizadas, relativamente às análises genéricas até aqui efectuadas, devido ao facto das tarefas envolvidas não serem críticas e existir interacção com pessoas. No entanto, além de ser um caso representativo de uma indústria com expressão significativa no âmbito nacional, é importante a referência de uma aplicação concreta.

O facto de ainda não existirem especificações detalhadas acerca das diversas aplicações descritas, e mesmo dos requisitos de comunicação com os vários postos de trabalho, ao nível da quantidade de dados, torna complexa a tarefa de projecto da rede ou redes de suporte. Assim, interessa analisar as diferentes hipóteses que se colocam.

Em primeiro lugar, tem que se identificar os requisitos das aplicações descritas em termos de comunicação. Posteriormente, serão abordados os aspectos envolvidos com o projecto da rede entre postos de trabalho e entre controladores de linha.

6.10.1 Fluxo de informação

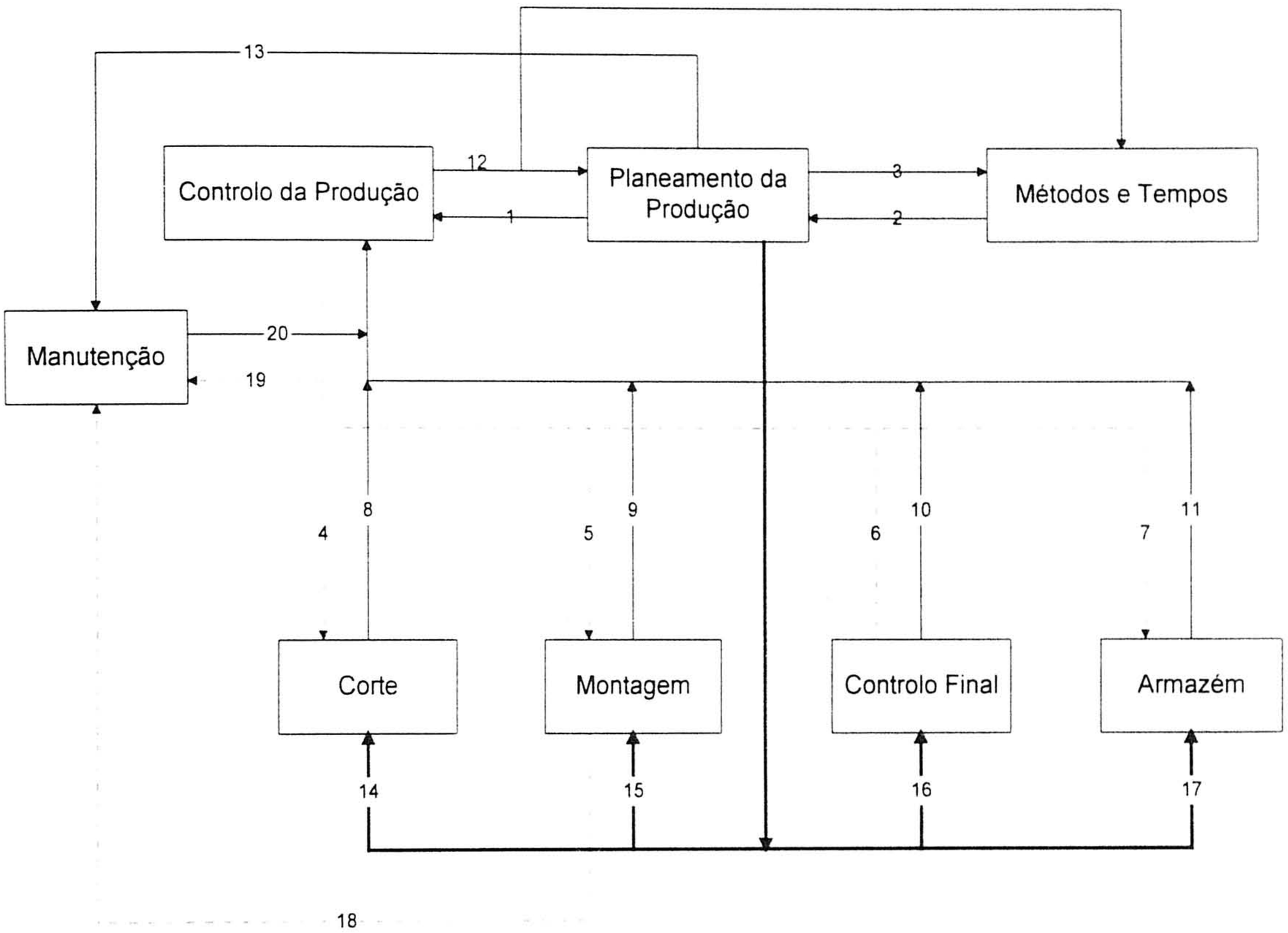


Fig: 6.3 - Fluxo de informação

Os principais fluxos de informação encontram-se descritos na Fig. 6.3. Apresenta-se a seguir uma breve descrição:

1. Envio do planeamento e ordens de fabrico.
2. Definição do processo operatório e layout.
3. Envio da ficha técnica.
4. Requisição de peças cortadas.
5. Requisição de montagem.
6. Requisição de controlo final.
7. Requisição de embalagem.

8. Comunicação de fim de corte ou anomalias.
9. Comunicação de fim de montagem ou anomalias.
10. Comunicação de fim de controlo final ou anomalias.
11. Comunicação de conclusão da embalagem.
12. Avanço das ordens de fabrico.
13. Envio da ficha técnica das máquinas e acessórios.
14. Ordem de fabrico e especificação global para corte de determinado modelo.
15. Ordem de fabrico e especificação global para montagem.
16. Ordem de controlo final.
17. Ordem de aprovisionamento.
18. Avaria.
19. Comunicação de avaria.
20. Estado das máquinas.

6.10.2 Rede entre postos de trabalho

A integração implica a existência de uma interface com as operárias, de modo a conseguir obter os dados necessários para as aplicações já descritas. A obtenção dos dados tem que ser efectuada e disponibilizada de uma forma eficiente, com o objectivo de maximizar a produtividade. A existência desta interface não deve traduzir-se em tempos de operação maiores, pelo que neste tipo de indústria são normalmente utilizados os leitores de código de barras.

Ao nível da interface com as operárias, surgem várias possibilidades, dependentes essencialmente da informação que se pretende transmitir do controlador de linha para o posto de trabalho. No sentido inverso, ou seja, do posto para o controlador, a comunicação resume-se ao envio periódico dos tempos de operação e da transmissão de anomalias, como por exemplo, falta de matéria-prima.

Apesar dos tempos de operação muito curtos, e mesmo que o controlo destes fosse efectuado individualmente, o volume de informação do conjunto dos postos de trabalho de uma linha é muito reduzido.

O facto da primeira abordagem não prever o controlo unitário quer das operações, quer das peças, prende-se com a influência que esta opção acarretaria na produtividade, dado prejudicar os tempos de operação numa percentagem não desprezável.

Pelo facto de ser possível a execução de várias operações sobre a mesma peça e no mesmo posto de trabalho, existem várias formas de efectuar o controlo. Dado que as operações são muito rápidas, o tempo de identificação de todas as peças ou operações seria uma parcela muito prejudicial na produtividade global. Com a opção pelo controlo ao lote, não é possível a separação dos intervalos de tempo de todas as operações que coexistem no mesmo posto. Esta perda de resolução não é muito importante para o objectivo final. O controlo ao lote funciona como uma filtragem prévia passa-baixo que se revela útil na eliminação de perturbações pontuais que ocorrem necessariamente com o comportamento humano.

A resolução máxima obtida pela monitorização condiciona a sua eficácia e está intimamente relacionada com a dimensão dos lotes, que deverá, sob este ponto de vista, não ser muito grande (cerca de uma dezena de peças). De qualquer forma, o volume de informação é reduzido.

A informação disponibilizada à operária pelo controlador de linha condiciona a opção final. Se a variável custo for preponderante, dado o número de postos de trabalho, esta informação será minimizada e o elemento que interactua com a operária será necessariamente simples. Incluem-se neste campo, os terminais com *displays* com poucas linhas de caracteres.

Neste caso, a informação consiste, por exemplo, na identificação da operação que tem que realizar, ou em algum parâmetro que quantifique o seu desempenho no contexto da linha, de modo a ter a percepção do nível de stocks a montante e a jusante. Assim, o volume de informação é reduzido pelo que não levanta problemas às propostas enunciadas de redes de campo menos complexas. Uma possibilidade é o recurso a um concentrador, em que esta transmissão é efectuada ponto a ponto, cuja vantagem reside no baixo custo.

A discussão realizada até aqui acerca da *ethernet* e do seu mecanismo de acesso, revela-se útil na avaliação de uma proposta descrita em [Burd, 89] que consiste na utilização de um mecanismo de acesso CSMA/CD sobre um microcontrolador genérico, recorrendo à UART normalmente presente nestes integrados. Esta proposta de muito baixo custo não é comparável à norma IEEE 802.3, nomeadamente em termos de *overhead*, mas a forma de acesso é semelhante. Devido ao facto de não haver exigências de tempo-real, esta opção assume-se extremamente atractiva,

sendo necessário, no entanto, quantificar o regime máximo de tráfego dada a capacidade mais limitada do canal de transmissão. No entanto, a sua maior desvantagem para esta aplicação não reside no mecanismo de acesso, mas na imunidade ao ruído. Este protocolo é implementado sobre RS-232, cujas características neste aspecto não permitem a sua utilização em ambientes muito ruidosos, como é o caso.

A utilização de uma solução ponto a ponto, seja qual for o elemento de interface, pode ser considerada superior em termos de fiabilidade ao nível do meio de transmissão, dado que a ruptura de uma ligação não obsta ao correcto funcionamento das restantes. Mas é mais cara no aspecto das ligações (cablagem), e incorre em todas as desvantagens já referidas acerca dos sistemas centralizados, por exemplo, ao nível da possibilidade de falha do elemento central, o qual pode constituir um estrangulamento da aplicação.

O volume de informação do conjunto de postos de trabalho desta solução, pode perfeitamente ser suportado pelas redes de campo menos complexas, concretamente o CAN, cujas vantagens em termos de preço e eficiência podem ser decisivas. O raio de acção limitado para cadências elevadas é uma das principais desvantagens desta solução, a qual não é muito significativa neste caso, visto o comprimento máximo exigido não exceder os 30 metros.

No outro extremo, em matéria de preço, encontra-se a disponibilização de informação do tipo gráfico em todos os postos de trabalho. Mesmo com a utilização de monitores monocromáticos de caracteres, esta solução apresenta custos elevados. A comunicação neste caso, poderia ser realizada com o recurso a uma solução centralizada, com vários terminais não inteligentes, ou com o recurso à *ethernet*.

Apesar de não se colocar de parte o desenvolvimento destes terminais, baseados num microcontrolador, a solução final depende da disponibilidade no mercado das opções referidas. Existem outras soluções proprietárias cuja vantagem em termos de preço pode ser decisiva.

O facto de não ser conhecido o protocolo usado, ou seja, do reduzido grau de abertura da solução preconizada para a rede entre postos de trabalho, não implica que o controlador de linha que concentra a informação esteja limitado em termos de abertura.

6.10.3 Rede entre controladores de linha

A rede que interliga os controladores de linha tem características semelhantes à rede intercelular que tem constituído o foco deste trabalho. As aplicações finais e o fluxo de informação já foram

objecto de descrição, pelo que o próximo passo é a tradução dos requisitos dessas aplicações em requisitos de comunicação.

Verifica-se que o factor decisivo é o *throughput*, em detrimento do tempo de resposta, dados os fluxos de informação assinalados. Assim, o passo seguinte seria a caracterização pormenorizada de cada um destes fluxos. Devido ao facto das especificações detalhadas das diversas aplicações estarem ainda na fase de projecto, esta tarefa torna-se complexa.

O maior volume de informação consiste na transmissão das directivas elaboradas pelo planeamento e balanceamento da produção aos diversos controladores de linha, armazém, e corte. Este fluxo tem toda a vantagem em ser realizado inicialmente, ou seja, com a produção ainda parada. Pode considerar-se uma componente de *setup*.

Mesmo que haja necessidade de transmissão desta informação em simultâneo com a informação de controlo da produção, o que se verifica efectivamente se houver alterações nos planos iniciais, o volume de informação global não se aproxima dos 10 Mbps. Os cálculos foram realizados com a ajuda da tabela de volume de informação por fonte, presente em [Stallings, 84].

No entanto, é importante fazer uma chamada de atenção, pois apesar do volume de informação não ser significativo num intervalo de tempo mais alargado, o facto de existirem instantes de tempo em que parte da largura de banda é ocupada pela transmissão de grandes quantidades de informação, levanta problemas de qualidade de serviço da rede *ethernet* já mencionados anteriormente.

Assim, nos intervalos em que esta situação ocorre, existem condições propícias à ocorrência do efeito de captura, e a transmissão da informação de controlo da produção pode ser menos eficiente. De qualquer forma, as exigências temporais não são de forma a eliminar esta solução, mas é necessário assegurar, recorrendo a um protocolo fiável, que a transmissão destes pacotes é efectuada se ocorrer a pior situação: a de perda do pacote por excesso de colisões. Esta exigência é usualmente imposta aos protocolos de comunicação em sistemas de fabrico.

De qualquer forma, este é o exemplo do tipo de aplicação em que não se colocam exigências de tempo-real ao nível da comunicação suportada pela rede intercelular, pelo que a rede *ethernet* faz valer os seus trunfos a nível de custos, simplicidade e disponibilidade nas mais variadas plataformas de *hardware* e *software*.

Não deve ser esquecido outro aspecto muito importante do projecto de rede, que é a existência de ruído na planta fabril. A imunidade ao ruído da rede *ethernet* não levanta normalmente problemas neste capítulo, sendo similar à das outras redes locais. A opção pela variante 10base5,

mais onerosa, mas com melhores características neste aspecto, só inferiores à versão em fibra óptica, apresenta-se inicialmente como o melhor compromisso. O comprimento máximo superior também se pode revelar importante, visto as secções descritas no fluxo produtivo se encontrarem muito separadas geograficamente.

6.10.4 Integração

São facilmente identificáveis diferenças entre as aplicações referidas, nomeadamente no que diz respeito ao tráfego. A aplicação de controlo e monitorização da produção gera tráfego com características diferentes (geralmente pacotes mais curtos, exceptuando a transmissão dos planos), das outras aplicações descritas.

O suporte de ferramentas de maior valor acrescentado como, por exemplo, grandes bases de dados, X-Motif e NFS, nas aplicações de planeamento, balanceamento e simulação revela-se imperioso, ao contrário da aplicação que lida mais directamente com o processo produtivo. A rede *ethernet* é uma proposta válida e amplamente utilizada no suporte do tráfego exigido por este tipo de aplicações.

De acordo com uma das conclusões de [Boggs, 88], a coexistência de tráfego muito diverso traduz-se prejudicialmente na performance total. Desta forma, justifica-se a segmentação entre os dois grupos de aplicações já mencionados, mesmo que o volume de informação o não justifique. Esta solução é também vantajosa em termos de fiabilidade. O requisito anteriormente referido de imunidade ao ruído também assume proporções diferentes, pelo que no grupo de aplicações de gestão da produção, o factor custo pode ser determinante na opção pela *ethernet* 10base2 ou 10baseT.

A comunicação com as restantes secções, cujos fluxos de informação já foram descritos, está sujeita aos mesmos requisitos da rede entre controladores de linha. A utilização da rede *ethernet* surge como alternativa viável. O suporte destas secções pelo mesmo segmento de rede depende essencialmente do número de nós.

Outra decisão a tomar consiste na identificação dos requisitos do nível superior, ou seja, do nível administrativo. Mesmo que o tráfego não justifique a segmentação da rede, esta solução mais onerosa é superior em termos de fiabilidade e performance. Pela descrição efectuada é evidente o grau de dependência de todo o sistema relativamente às redes que servem a produção.

6.11 Conclusões

A rede *ethernet* assume nesta aplicação o papel de elemento integrador, fazendo também valer as suas outras vantagens. A sua principal desvantagem de não possuir um tempo máximo de transmissão não se revela significativa face aos requisitos impostos; a sua utilização surge como a opção correcta.

O conhecimento detalhado das suas particularidades e, principalmente, dos seus problemas revela-se imprescindível para defender esta solução para este e outros casos. Convém relembrar que se trata de uma primeira aproximação, pelo que até à decisão final, ainda se realizarão várias iterações.

A existência de vários graus de liberdade a nível das especificações relativas às aplicações descritas implica o não conhecimento das características do tráfego. Por exemplo, quando é que a informação recolhida a nível do controlador de linha é transmitida para o nível superior? Só quando ocorre uma situação anómala, ou periodicamente? Estes aspectos também podem ser optimizados para a tecnologia de suporte e sintonizados após o desenvolvimento das aplicações.

As plataformas de *hardware* são na sua maior parte PCs. A possibilidade de interligação de qualquer outro tipo de equipamento é outra das vantagens da rede *ethernet*, dado que esta opção é suportada, na maioria dos casos.

Estão perfeitamente identificados e hierarquizados os vários níveis deste sistema de fabrico, em que faz todo o sentido, pelos argumentos referidos, serem servidos por segmentos de rede diferentes.

A opção pelo mesmo tipo de rede (*ethernet*), mesmo que não extensível ao nível hierarquicamente mais baixo, ou seja, da interligação dos terminais de recolha de dados, revela-se vantajosa em termos de custo e simplicidade da interface entre os vários segmentos de rede; além de que a presença de uma só tecnologia é vantajosa no que se refere ao *know-how* necessário. Acima de tudo, permite a integração necessária entre todas as aplicações.

Capítulo 7

Conclusões

A integração nos sistemas de fabrico actuais tem sido a forma de responder às necessidades crescentes de produtividade e competitividade. No entanto, este objectivo não é facilmente atingido devido à diversidade de equipamentos e aos requisitos muito distintos impostos nos vários níveis de um sistema de fabrico.

Neste contexto, as redes de comunicação têm desempenhado um papel fundamental, condicionando o próprio conceito de integração. A utilização das redes locais objecto de normalização surge como alternativa à utilização do MAP, para conseguir a interligação entre todos os equipamentos presentes no sistema de fabrico.

A rede *ethernet,* pela sua extensa utilização nas mais variadas aplicações, e devido ao facto de ser uma opção de comunicação presente na maioria dos equipamentos torna-se uma alternativa muito válida na tentativa de atingir a integração.

No entanto, o seu desempenho é influenciado por um conjunto de factores. Estes factores vão desde a posição ocupada pelas estações e comprimento do cabo, ou seja, a topologia até aos instantes de geração de tráfego e dados históricos do canal. Este último factor está relacionado com o número de mensagens à espera para serem transmitidas nas diversas estações e com os contadores que registam o número de colisões verificadas para uma mensagem determinada.

A sua característica de tempo de acesso aleatório não permite a sua utilização em aplicações tempo-real, comprometendo a possibilidade de integração de todo o sistema de fabrico com o recurso a uma só tecnologia.

As vantagens da rede *ethernet* já referidas e o baixo custo são a justificação para a análise em termos de tempo-real da sua aplicação como elemento integrador dos sistemas de fabrico.

Torna-se importante identificar os problemas associados a esta solução. Verificou-se que o mito a respeito da saturação da rede para cargas baixas (37%) não corresponde à realidade. Este aspecto, que foi várias vezes referido como estabilidade do sistema de comunicação, só se verifica para níveis de utilização muito exigentes.

O tempo de resposta pode assumir valores muito elevados como se verificou nos testes efectuados. Apesar de alguns dos tempos obtidos serem justificados pelo sistema operativo utilizado, cujo atendimento e processamento de interrupções não se revelou muito limitado em termos temporais, o registo de perdas de pacotes por excesso de colisões exige uma reflexão cuidadosa.

O objectivo dos testes experimentais não foi o de obter um conjunto muito extenso de resultados sob várias condições, mas contextualizar a rede *ethernet* como elemento de um sistema de comunicação. A decisão acerca do sistema operativo resultou deste objectivo.

Foi também analisado o denominado efeito de captura. Este efeito decorrente da evolução das plataformas de *hardware,* introduz mais um grau de dispersão no tempo de resposta do sistema de comunicação, apesar de poder ser vantajoso em termos de desempenho (*throughput*).

Nos testes realizados, o efeito de captura foi o responsável pela perda de pacotes por excesso de colisões registados. Esta perda foi mais visível aquando dos testes com pacotes de dimensão muito diferente. Os pacotes de menor tamanho têm maior dificuldade em aceder ao meio físico quando este se encontra com regimes elevados de tráfego constituído por pacotes de grande dimensão. Os regimes de carga para os quais se registaram estas situações não foram muito elevados (a partir de 50%), pelo que é preciso ter este facto presente aquando da defesa da solução *ethernet.*

Apesar da estabilidade não estar em causa, para regimes de carga que não atinjam valores muito elevados, a existência do efeito de captura vem agravar a grande desvantagem da rede *ethernet* para sistemas tempo-real: o tempo de acesso não limitado.

De qualquer forma, a utilização da rede *ethernet* para sistemas não críticos pode ser equacionada, desde que se tenha em atenção as particularidades do seu funcionamento. Concretamente, minimizando o número de estações por segmento de rede e separando aplicações com tráfego muito distinto podem atingir-se bons níveis de desempenho. Esta situação foi verificada em alguns testes realizados.

Em sistemas críticos que exijam um limite temporal para a comunicação, não é possível o recurso à rede *ethernet.* Assim, o objectivo de integração não pode ser atingido com o recurso a

esta tecnologia. No entanto, foram realizados vários estudos que pretenderam ultrapassar este obstáculo e que foram descritos no capítulo três.

As propostas de alteração do mecanismo de acesso têm subjacentes diferentes objectivos e requisitos, pelo que assumem formas muito distintas, mas traduzem-se na possibilidade de estender a rede *ethernet*, apesar de modificada, a todo o sistema fabril.

Estas propostas têm como objectivo aproveitar redes já existentes, facilitar a integração ou, simplesmente, obter uma solução dedicada com recurso a *hardware* de baixo custo.

O conjunto de propostas foi analisado, levando em consideração aspectos relacionados com a implementação na plataforma de desenvolvimento descrita nos capítulos quatro e cinco. Nomeadamente, equacionou-se a possibilidade de implementação das várias propostas sem que fossem necessárias alterações de *hardware*. Este critério, que pretende não restringir a transposição da solução encontrada, reduz significativamente o conjunto de possibilidades.

Finalmente, foi analisado um caso prático que não possui exigências de tempo-real. Esta aplicação forneceu algumas das condições que foram testadas, no sentido de se verificar que a rede *ethernet* era uma opção correcta como elemento integrador, neste caso concreto.

Tendo em vista um objectivo num horizonte temporal mais alargado, pretendeu-se que a plataforma desenvolvida permitisse o teste de outros métodos de controlo, concretamente o controlo em malha fechada. Além disso, a plataforma de teste desenvolvida também permite o estudo de mecanismos de tolerância a falhas que são imprescindíveis em sistemas críticos, e que não mereceu muita atenção por parte das propostas referidas.

A plataforma de teste desenvolvida é assim perfeitamente genérica, de modo a suportar soluções que visem responder aos mais diversos critérios impostos à comunicação. O único aspecto que limita a plataforma de teste é o facto do sistema operativo não ser tempo-real. No entanto, esta é uma limitação cujo fim está previsto. De qualquer forma, a transposição dos algoritmos desenvolvidos para outras plataformas tem que ser avaliada.

Por outro lado, a interligação dos segmentos de rede modificados com os normalizados tem que ser equacionada.

Referências

[Acharya] Madhu K. Acharya, Bharati Bhalla, R. E. Newman-Wolfe, Haniph A. Latchman and Randy Chow

"Hierarchical Characterization and Flow Modelling of Computer Network Traffic Using Real-Time Measurements"

University of Florida

[Adelstein, 94] Frank Adelstein and Mukesh Singhal

"Priority Ethernets: Promises and Challenges"

Dept. of Computer and Information Science - The Ohio State University

February 1994

[Almes, 79] Guy T. Almes and Edward D. Lazowska

"The Behavior of Ethernet-Like Computer Communications Networks"

Proceedings of the 7th Symposium on Operating Systems Principles, ACM SIGCOMM

December 1979

[Armyros, 92] Speros Armyros

"On the Behavior of Ethernet: Are Existing Analytic Models Adequate?"

University of Toronto

February 1992

[Arvind, 91] K. Arvind, Krithi Ramamritham and Jonh A. Stankovic

"A Local Area Network Architecture for Communication in Distributed Real-Time Systems"

Real-Time Systems, vol.3, no.2

May 1991

[Bauer, 91] A. Bauer, R. Bowden, J. Browne, J. Duggan and G. Lyons

Shoop Floor Control Systems - From Design to Implementation

Chapman & Hall

1991

[Beuerman, 88] Steven L. Beuerman and Edward J. Coyle

"The Delay Characteristics of CSMA/CD Networks"

IEEE Transactions on Communications, vol. 36, no. 5

May 1988

[Boggs, 88] David R. Boggs, J. C. Mogul, and C.A. Kent

"Measured Capacity of an Ethernet: Myths and Reality"

Proceedings of ACM SIGCOMM 88

August 1988

[Burd, 89] Nick Burd

"CSMA/CD *microcontroller communication network for low-level control"*

Microprocessors and microsystems, Vol 11

September 1989

[Bux, 81] Werner Bux

"Local-Area Subnetworks: A Performance Comparison"

IEEE Transactions on Communications, vol. COM-29, no. 10

October 1981

[Bux, 84] W. Bux

"Performance Issues in Local-Area Networks"

IBM Systems Journal, vol. 23, no. 4

1984

[Cabrera, 88] Luis-Felipe Cabrera, Edward Hunter, Michael J. Karels and David A. Mosher
"User-Process Communication Performance in Networks of Computers"
IEEE Transactions in Software Engineering, Vol. 14, No 1,
January 1988

[Chlamtac, 79] Imrich Chlamtac, William R. Franta and K. Dan Levin
"BRAM: The Broadcast Recognizing Access Method"
IEEE Transactions on Communications, vol. COM-27, no. 8
August 1979

[Coyle, 83] Edward J. Coyle And Bede Liu
"Finite Population CSMA/CD Networks"
IEEE Transactions on Communications, vol. COM-31, no. 11
November 1983

[Coyle, 85] Edward J. Coyle and Bede Liu
" A Matrix Representation of CSMA/CD Networks"
IEEE Transactions on Communications, vol. COM-33, no. 1
January 1985

[Cox, 96] Alan Cox
"Network Buffers and Memory Management"
Linux Journal, issue 29
September 1996

[Delesio, 95] L. R. Delesio, M. R. Kraimer and A. J. Kozubal
"EPICS Architecture"
http://csg.lbl.gov
1995

[Ditts] D. M. Ditts, N. P. Boyd and H. H. Whorms

"The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems"

Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, no. 1

[English, 96] Erin English

"Ethernet Looks to a Gigabit Future"

IEEE Computer

June 1996

[ESPRIT, 92] ESPRIT Project 5104

"Research Report on Higher Performance Architectectures"

CNMA

November 1992

[Gonsalves, 88] Timothy A. Gonsalves and Fouad A. Tobagi

"On the Performance Effects of Station Locations and Access Protocol Parameters in Ethernet Networks"

IEEE Transactions on Communications, vol. 36, no. 4

April 1988

[Gusella, 90] Riccardo Gusella

"A Measurement Study of Diskless Workstation Traffic on an Ethernet"

IEEE Transactions on Communications, vol. 38, no. 9

September 1990

[Hansen, 79] Lynn W. Hansen and Mischa Schwartz

"An Assigned-Slot Listen-Before-Transmission Protocol for a Multiaccess Data Channel"

IEEE Transactions on Communications, vol. COM-27, no. 6

June 1979

[Hutchison, 87] D. Hutchison and M. Merabti

"Ethernet for Real-Time Applications"

IEE Proceedings, vol. 134, Pt. E, no. 1

January 1987

[Jacobson, 88] Van Jacobson and Michael J. Karels

"Congestion Avoidance and Control"

Proceedings of SIGCOMM' 88-ACM

1988

[Jacobson, 88a] Van Jacobson

"Maximum Ethernet Throughput"

TCP-IP Discussion Group

1988

[Jacobson,92] V. Jacobson, R. Braden and D. Boorman

"TCP Extensions for High Performance"

RFC 1323 Network Working Group

May 1992

[Kara, 94] M. Kara, R. Drew, N. D. Hunter, J. Jackson and P. M. Dew

"An Empirical Study of Video Application Performance over ATM and Ethernet Networks"

Proceedings of the Second IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks

July 1994

[Kleinrock, 80] Leonard Kleinrock and Michel o. Scholl

"Packet Switching in Radio Channels: New Conflict-Free Multiple Access Schemes"

IEEE Trasactions on Communications, vol. COM-28, no. 7

July 1980

[Leong, 88] John Leong

"A Pratical Guide to Ethernet"

Carnegie Mellon University

1988

[Lewis, 93] S. Lewis

"Overview of the Experimental Physics and Industrial Control System: EPICS"

Lawrence Berkeley Laboratory

August 1993

[Liu, 87] Yih-Chiao Liu and Gary L. Wise

"Performance of a CSMA/CD Protocol for Local Area Networks"

IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-5, no. 6

July 1987

[McCanne, 93] Steven McCanne and Van Jacobson

"The BSD Packet Filter: A New Architecture for User-level Packet Capture"

1993 Winter USENIX conference

January 1993

[Meditch, 83] James S. Meditch and Chin-Tau A. Lea

"Stability and Optimization of the CSMA and CSMA/CD Channels"

IEEE Transations on Communications, vol. COM-31, no. 6

June 1983

[Metcalfe, 76] Robert M Metcalfe and David R. Boggs

"Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks"
Communications of the ACM, vol. 19, no. 7
July 1976

[Mitchell, 86] Lionel C. Mitchell and David A. Lide
"End-To-End Performance Modelling of Local Area Networks"
IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. SAC-4, no. 6
September 1986

[Mitchell, 91] F. H. Mitchell, Jr.
CIM Systems: An Introduction to Computer-Integrated Manufacturing
Prentice Hall
1991

[MITS, 94] MiTS - Maritime IT Standard
MiTS Architecture V3.0

[Molle, 94] Mart L. Molle
"A New Binary Logarithmic Arbitration Method for Ethernet"
Computer Systems Research Institute
University of Toronto
1994

[Pimentel, 90] J.R. Pimentel
Computer Networks for Manufacturing
Prentice-Hall International Editions
1990

[Pleinevaux, 90] P. Pleinvaux
"Architecture de Communication pour le Temps Reel Strict"
These n° 892

1990

[Pritty, 95] D. W. Pritty, J. R. Malone, D. N. Smeed, S. K. Banerjee and N. L. Lawrie

"A Real-Time Upgrade for Ethernet Based Factory Networking"

IEEE Proceedings of IECON

1995

[Sastry, 85] A. R. K. Sastry

"Maximum Mean Data Rate in a Local Area Network with a Specified Maximum Source Message Load"

Proceedings of INFOCOM 85

1985

[Seifert, 95] Rich Seifert

"The effect of Ethernet behaviour on networks using high-performance workstations and servers"

Technical Report - Network and Communication Consulting

March 95

[Shoch, 82] John F. Shoch, Yogen K. Dalal, David D. Redell and Ronald C. Crane

"Evolution of the Ethernet Local Computer Network"

IEEE Computer

August 1982

[Stallings, 84] William Stallings

"Local Networks"

Computing Surveys, vol. 16, no. 1

March 1984

[Stallings, 84a] William Stallings

"Local Network Performance"

IEEE Communications Magazine, vol. 22, no. 2
February 1984

[Stevens, 94] W. Richard Stevens
TPC/IP Illustrated, Volume 1 The Protocols
Addison-Wesley Publishing Company
1994

[Stevens, 95] W. Richard Stevens and Gary R. Wright
TPC/IP Illustrated, Volume 2 The Implementation
Addison-Wesley Publishing Company
1995

[Tanenbaum, 88] Andrew S. Tanenbaum
Computer Networks
Prentice-Hall
1988

[Tobagi, 80] Fouad A. Tobagi and V. B. Hunt
"Performance Analysis of Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection"
Computer Networks, 4
October 1980

[Tobagi, 82] Fouad A. Tobagi
"Carrier Sense Multiple Access with Message-Based Priority Functions"
IEEE Transactions on Communications, vol. COM-30, no. 1
January 1982

[Turiel, 96] Javier Pérez Turiel, Juan C. Fraile Marinero and Jose R. Perán González
"CSMA/PDCR: A Random Access Protocol Without Priority Inversion"

IEEE Proceeding of IECON

1996

[Venkatramani, 95] Chitra Venkatramani and Tzi-cker Chiueh

"Design, Implementation, and Evaluation of a Software-based Real-Time Ethernet Protocol"

SIGCOMM '95-ACM

1995

[Veríssimo, 94] Paulo Jorge E. Veríssimo

"Sumário da Lição de Síntese sobre Comunicação em Sistemas Distribuídos"

DEEC-IST

1994

[Whetten] Brian Whetten, Sphen Steinberg and Domenico Ferrari

"The Packet Starvation Effect in CSMA/CD LANs and a Solution"

University of California at Berkeley

[Wood, 85] David C. Wood

"Local Area Network Standards"

Edited by Tom Bartee

Howard W. Sams & Co. , Data Communications, Networks and Systems

1985

[Yavatkar, 92] Rajendra Yavatkar, Prashant Pai and Raphael Finkel

"A Reservation-based CSMA Protocol for Integrated Manufacturing Networks"

University of Kentucky

October 1992

[Zhao, 87] Wei Zhao and Krithi Ramamritham

"Virtual Time CSMA Protocols for Hard Real-Time Communication"

IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-13, no. 8

August 1987

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000051819