

Múltiplo Acesso em Redes de Telecomunicações

Autor: José Marcos Câmara Brito

Orientador: Prof. Dr. Ivanil S. Bonatti

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por José Marcos Câmara Brito e aprovada pela comissão julgadora em 21.10.98
Bonatti

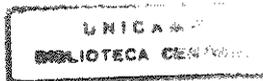
Dissertação submetida à Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

10.12.98

B777m

36485/BC

Dezembro de 1998.



UNIDADE	7C
N.º CHAMADA:	
V.	Ex.
TOMBO BC/	36485
PROC.	229199
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	05/02/99
N.º CPD	

CM-00120726-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B777m

Brito, José Marcos Câmara Brito

Múltiplo acesso em redes de telecomunicações. /
José Marcos Câmara Brito.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Ivanil S. Bonatti

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Telecomunicações. 2. Redes locais de
computação. 3. Redes metropolitanas de computação.
4. Sistema de comunicação móvel. I. Bonatti, Ivanil S.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivanil Sebastião Bonatti - UNICAMP

Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá - INATEL

Prof. Dr. Shusaburo Motoyama - UNICAMP

Prof. Dr. Pedro Luis Dias Peres - Suplente - UNICAMP

À minha mãe, Nisia, minha eterna
incentivadora, e ao meu filho, Felipe,
pelos momentos de diversão.

Registro meus agradecimentos ao meu orientador, Prof. Ivanil S. Bonatti, cuja postura construtiva contribuiu de forma significativa para a conclusão deste trabalho.

“E, assim como as ações da vida às vezes não comportam adiamentos, é verdade que, quando não está em nosso poder discernir as opiniões mais verdadeiras, devemos ouvir as mais prováveis, e mesmo, ainda que não percebamos em umas mais probabilidades do que em outras, devemos, não obstante, decidir-nos por algumas e posteriormente considerá-las não mais como duvidosas, na medida em que se relacionam com a prática, mas como verdadeiras e certas, porquanto assim se apresenta a causa que a isso nos compeliu”.

René Descartes

“Achava-me com tantas dúvidas e indecisões, que me parecia não ter obtido outro proveito, ao procurar instruir-me, senão o de ter revelado cada vez mais a minha ignorância”.

René Descartes

RESUMO

O desempenho das principais técnicas de múltiplo acesso e suas aplicações nas redes de telecomunicações são analisados nesta dissertação. Os protocolos de acesso são classificados em cinco categorias: alocação fixa; acesso aleatório; alocação por demanda com controle centralizado; alocação por demanda com controle distribuído; e protocolos híbridos. As potencialidades e limitações dos protocolos básicos de cada categoria são analisados. Analisa-se também a aplicabilidade dos protocolos de acesso nos sistemas de comunicações por satélite, de comunicações móveis terrestres, WLL (*Wireless Local Loop*), e nas redes locais e metropolitanas de alta velocidade, redes all-optical, redes locais sem fio, e redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) sem fio.

ABSTRACT

The performance of the main multiple access techniques and their applications in telecommunications networks are analysed in this dissertation. The access protocols are classified in five categories: fixed assignment; random access; demand assignment with central control; demand assignment with distributed control; and hybrid protocols. The potentialities and limitations of the basic protocols in each category are analysed. The applicability of the access protocols in satellite communications systems, mobile communications systems, wireless local loop, high-speed local area networks, high-speed metropolitan area networks, all-optical networks, wireless local area networks, and wireless ATM (Asynchronous Transfer Mode) networks are analysed too.

ÍNDICE

Lista de acrônimos	i
Lista de símbolos	iv
Capítulo I - Introdução	1
1. Classificação dos protocolos	1
2. Parâmetros de desempenho	2
Capítulo II - Protocolos básicos	4
1. Múltiplo acesso com alocação fixa	5
1.1. Múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA)	5
1.2. Múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA)	8
1.3. Múltiplo acesso por divisão de código (CDMA)	10
2. Múltiplo acesso aleatório	16
2.1. Múltiplo acesso Aloha	16
2.2. Múltiplo acesso Slotted-Aloha	17
2.3. Carrier Sense Multiple Access (CSMA)	20
2.4. CSMA com detecção de colisão (CSMA-CD)	23
3. Múltiplo acesso com alocação por demanda e controle centralizado	25
3.1. Roll-Call Polling	25
3.2. Hub Polling	26
3.3. Análise de desempenho das técnicas de polling	27
4. Múltiplo acesso com alocação por demanda e controle distribuído	32
4.1. Protocolo de passagem de ficha em redes em anel	32
4.1.1. Operação com múltiplas fichas	36
4.1.2. Operação com pacote único	36
4.1.3. Operação com ficha única	37

5. Protocolos híbridos	39
5.1. Reservation Aloha	40
5.2. TDMA com reserva (R-TDMA)	41
5.3. Reservation Aloha II (R-Aloha)	42
6. Conclusão	48
Capítulo III - Comunicação móvel terrestre e redes de acesso sem fio	49
1. Sistemas de Comunicação Móvel	49
1.1. Reuso de Frequências	50
1.2. Considerações sobre o protocolo de acesso	52
1.2.1. FDMA x TDMA	52
1.2.2. CDMA	54
1.2.3. Outros fatores que influenciam a capacidade dos sistemas	55
2. Sistemas Wireless Local Loop (WLL)	60
2.1. Protocolos de múltiplo acesso	62
2.2. Comparação de desempenho	63
3. Packet Reservation Multiple Access (PRMA)	64
4. Conclusão	65
Capítulo IV - Redes de comunicação por satélite	69
1. Múltiplo acesso em redes VSAT	72
1.1. Capacidade de canal com múltiplo acesso Aloha	74
1.2. Considerações sobre a escolha do protocolo de acesso	76
2. Sistemas de Comunicações Móveis	80
2.1. Considerações sobre a escolha do protocolo de acesso	81
3. Conclusão	84
Capítulo V – Redes de alta velocidade	85
1. Considerações iniciais	85
2. Fiber Distributed Data Interface (FDDI)	86
3. Distributed Queue Dual Bus (DQDB)	90

3.1. Descrição básica do protocolo	91
3.2. Análise de desempenho do DQDB	93
4. Redes all-optical	97
4.1. Classificação das redes all-optical	99
4.1.1. Redes com roteamento em comprimento de onda	99
4.1.2. Redes broadcast-and-select	100
4.2. Múltiplo acesso em redes all-optical	103
4.2.1. Técnicas de acesso aleatório	103
4.2.2. Técnicas com alocação fixa	104
4.2.3. Técnicas com alocação por demanda	104
5. Conclusão	105
Capítulo VI - Redes locais sem fio e Redes ATM sem fio	106
1. Redes locais sem fio	106
1.1. Análise dos protocolos de acesso	110
1.1.1. Multiple Access with Collision Avoidance (MACA)	110
1.1.2. Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless LAN's	112
1.1.3. Distributed Foundation Wireless Medium Access Control	116
2. Redes ATM sem fio	120
2.1. Considerações para a escolha do protocolo de múltiplo acesso	122
3. Conclusão	124
Capítulo VII - Conclusão	125
Anexo 01 - Exemplos numéricos	126
Referências bibliográficas	130

LISTA DE ACRÔNIMOS

AMPS - Advanced Mobile Phone System.

ATM - Asynchronous Transfer Mode.

AWGN - Additive White Gaussian Noise

BEB - Binary Exponential Backoff.

BPSK - Binary Phase Shift Keying.

BSA - Basic Service Area.

BSS - Basic Service Set.

CDMA - Code Division Multiple Access.

CSMA - Carrier Sense Multiple Access.

CSMA-CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.

CTS - Clear-to-Send.

DAMA - Demand Assigned Multiple Access.

DCA - Dynamic Channel Allocation.

DECT - Digital European Cordless Telecommunications.

DFWMAC - Distributed Foundation Wireless Medium Access Control.

DIFS - Distributed Coordination Function Inter-Frame Space.

DQDB - Distributed Queue Dual Bus.

DQSM - Distributed Queue State Machine.

DS - Direct Sequence em sistemas CDMA ou Data-Sending no protocolo MACAW.

DSI - Digital Speech Interpolation.

E-TDMA - Extended TDMA.

FDDI - Fiber Distributed Data Interface.

FDMA - Frequency Division Multiple Access.

FEC - Forward Error Correction.

FH - Frequency Hopping.

GEO - Geostationary Satellite Orbit.

GSM - Global System for Mobile Communications.

HOB - Head of Bus.

IS54 - Padrão para telefonia móvel celular digital.

IS136 - Padrão para telefonia móvel celular digital.

LAN - Local Area Network.

LEO - Low Earth Orbit.

MAC - Medium Access Control.

MACA - Multiple Access with Collision Avoidance.

MACAW - Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless LAN's.

MAN - Metropolitan Area Network.

MASCARA - Mobile Access Scheme Based on Contention and Reservation for ATM.

MEO - Medium Earth Orbit.

MILD - Multiplicative Increase and Linear Decrease.

NAV - Network Allocation Vector.

PBX - Private Branch Exchange.

PDC - Personal Digital Cellular.

PDV - Packet Delay Variation.

PHS - Personal Handyphone System.

PN - Pseudo-Noise.

PRMA - Packet Reservation Multiple Access.

QoS - Qualidade de Serviço.

QPSX - Queued Packet and Synchronous Switch.

RTS - Request-to-Send.

SIFS - Short Inter-Frame Space.

TDD - Time-Division Duplex.

TDM - Time Division Multiplexing.

TDMA - Time Division Multiple Access.

THT - Token Holding Timer.

TRT - Token Rotation Timer.

TTR - Timed Token Rotation.

TTRT - Target Token Rotation Timer.

VBR - Variable Bit Rate.

VSAT - Very Small Aperture Terminal.

WAN - Wide Area Network.

WDM - Wavelength Division Multiplexing.

WDMA - Wavelength Division Multiple Access.

WLL - Wireless Local Loop.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Tempo de propagação normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote.
E_b	Energia de bit.
E_b/N_0	Relação entre a energia de bit e a densidade de ruído.
$E\{n^2\}$	Segundo momento da variável aleatória comprimento de pacote.
$E\{T\}$	Atraso médio de transferência de pacote.
$E\{T_a\}$	Atraso médio de acesso.
$E\{T_N\}$	Atraso médio de transferência de pacote, normalizado em relação ao tempo de transmissão de pacote.
$E\{T_q\}$	Tempo médio de permanência no sistema de um pacote.
$E\{T_r\}$	Tempo médio gasto com retransmissões devido a colisões nas técnicas de acesso aleatório.
$E\{T_s\}$	Tempo médio de serviço de um pacote.
$E\{W\}$	Tempo médio que um pacote permanece na fila.
G	Carga total em bits/segundo normalizada em relação a taxa de transmissão no canal.
G_v	Ganho de capacidade em sistema TDMA devido ao uso de DSI.
K	Fator de reuso em sistemas celulares.
K_{DCA}	Fator de reuso em sistema TDMA onde se implementa a técnica DCA.
L	Número médio de pacotes que uma estação transmite quando adquire a reserva de uma janela de tempo em protocolos híbridos com reserva.
M	Número de estações da rede.
n	Comprimento médio de um pacote.
N	Potência média de ruído térmico no canal.

N_0	Densidade de potência de ruído no canal.
N_s	Número de setores de uma célula.
P	Potência média de sinal no receptor proveniente de um transmissor.
P_b	Taxa de erro de bit.
R	Taxa de transmissão do canal de comunicação.
R_i	Taxa de bits entregue pela fonte (informação) em sistemas com espalhamento espectral.
S	Vazão normalizada em relação a taxa de transmissão no canal.
SNR	Relação sinal/ruído no canal.
T_c	Tempo de ciclo.
T_w	Walk time.
t_p	Tempo de propagação.
V	Número de <i>sub-slots</i> em um <i>slot</i> de reserva.
y	Latência de uma rede em anel, normalizada em relação ao tempo de transmissão de um pacote.
W	Largura de faixa do canal.
Z	Taxa de transmissão no canal em pacotes/segundo
α	Eficiência de largura de faixa de uma técnica de modulação digital.
β	Ganho de processamento em sistemas com espalhamento espectral.
χ	Latência do anel.
δ	Latência de uma estação em uma rede em anel.
ε	Margem de desvanecimento.
ϕ	Fator de sobreposição de feixes.
γ	Tempo de transmissão do reforço de colisão normalizado em relação ao tempo de propagação.

ϕ	Fator de perda de capacidade devido a interferência de outras células.
λ	Tráfego gerado por uma estação, em pacotes por segundo ou em mensagens por segundo.
Λ_i^r	Conjunto de comprimentos de onda alocados ao receptor em uma rede <i>all-optical</i> .
Λ_i^t	Conjunto de comprimentos de onda alocados ao transmissor em uma rede <i>all-optical</i> .
ν	Fator de atividade de voz.
θ	Fator de compensação de alcance.
ρ	Fator de utilização: do servidor de um sistema com fila, de um canal de comunicação, ou de uma estação.
σ	Tempo necessário para o transmissor ter a confirmação da entrega correta dos pacotes ou da ocorrência de uma colisão, nas técnicas de acesso aleatório.
σ_{Ts}	Desvio padrão do tempo de serviço de um pacote.
τ	Tempo médio de transmissão de um pacote.
ξ	Fator de redução de capacidade devido a imperfeições no controle de potência.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Em muitas redes de telecomunicações deseja-se compartilhar um determinado recurso de comunicação entre diversos usuários independentes, tornando-se necessário estabelecer regras para regular o acesso a este recurso. Ao conjunto destas regras denomina-se *protocolo de múltiplo acesso*.

O conceito de múltiplo acesso está presente nos sistemas de telecomunicações desde seus primórdios. Por exemplo, em 1965 o primeiro satélite geoestacionário de uso comercial, denominado Early Bird ou INTELSAT I, já permitia o compartilhamento de um *transponder* através de uma técnica de Múltiplo Acesso denominada Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (FDMA - *Frequency Division Multiple Access*); e em 1971 a Universidade do Haváí criou uma rede para interconectar seus computadores através de um canal rádio, utilizando a técnica de múltiplo acesso denominada *Aloha*, proposta por Norman Abramson em 1970.

Atualmente o múltiplo acesso está presente em quase todas as redes e sistemas de telecomunicações, como nas redes locais de computadores e redes metropolitanas, com ou sem fio, nas redes de comunicação por satélite, nas redes de comunicação móvel celular e redes de comunicação pessoal, e nas redes de acesso sem fio (WLL - *Wireless Local Loop*).

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização das técnicas de múltiplo acesso nas modernas redes de telecomunicações através da análise de seus desempenhos. A abordagem escolhida foi a de inicialmente analisar o desempenho dos protocolos básicos, a partir dos quais quase todos os outros derivam, indicando suas potencialidades e limitações, para então se concentrar na aplicação destes protocolos nas redes e sistemas de telecomunicações atuais.

1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROTOCOLOS

Os protocolos de múltiplo acesso diferem-se pela natureza estática ou dinâmica de alocação do recurso de comunicação aos usuários, pela natureza centralizada ou distribuída do processo de tomada de decisão, e pelo grau de adaptabilidade do algoritmo às mudanças comportamentais da rede, podendo ser classificados nas seguintes categorias [Peyravi96] [Sachs88] [Tobagi80]:

PROTOCOLOS COM ALOCAÇÃO FIXA - a alocação do recurso de comunicação aos usuários é feita de forma estática e independente da atividade das estações. O compartilhamento do canal de comunicação (recurso de comunicação) pode ser feito no domínio da frequência, do tempo, ou do código, dando origem às técnicas FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multi-*

ple Access). As técnicas com alocação fixa podem ser classificadas em ortogonais (FDMA e TDMA) e quase-ortogonais (CDMA).

PROTOCOLOS DE ACESSO ALEATÓRIO OU PROTOCOLOS COM CONTENÇÃO - cada estação decide quando acessar o canal, de acordo com sua demanda de tráfego, não havendo nenhum processo de coordenação entre as diversas estações da rede. Não há garantia que a transmissão de um dado pacote seja concluída com sucesso, uma vez que pode haver colisão entre pacotes transmitidos por estações diferentes. Os protocolos de acesso aleatório podem ainda ser classificados em assíncronos (ex., *Aloha*), síncronos (ex., *Slotted-Aloha*) e com detecção de portadora (ex., *Carrier Sense Multiple Access - CSMA*).

PROTOCOLOS COM ALOCAÇÃO POR DEMANDA - o canal de comunicação é alocado a cada estação da rede de acordo com sua demanda, existindo algum tipo de coordenação entre as estações, de modo a evitar as colisões presentes nos protocolos com acesso aleatório. O controle da alocação do canal pode ser centralizado, onde uma única estação é responsável por gerenciar a utilização do canal (ex., *Polling*), ou distribuído, onde todas estações executam um mesmo algoritmo para alocação do recurso de comunicação (ex., *Passagem de Ficha, Fila Distribuída*).

PROTOCOLOS HÍBRIDOS - são aqueles que incorporam características de mais de uma das classes anteriores (ex.: *Reservation-Aloha*).

2. PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Os protocolos de múltiplo acesso podem ser avaliados segundo diversos critérios, dentre os quais destacam-se:

VAZÃO (*THROUGHPUT*) - A vazão representa a capacidade efetiva do canal para transporte de informação. Seu valor normalizado é definido como a relação entre o número de pacotes transmitidos com sucesso em um dado intervalo de tempo e o número máximo de pacotes que poderiam ser transmitidos continuamente neste mesmo intervalo.

ATRASO DE TRANSFERÊNCIA DE PACOTE - intervalo de tempo entre o instante em que um pacote chega (ou é gerado) na estação e o instante em que ele é recebido com sucesso no receptor. Este tempo inclui o *atraso de acesso*, que é o intervalo entre o instante em que o pacote chega (ou é gerado) na estação e o instante em que a mesma inicia sua transmissão, o tempo de transmissão do pacote, e o tempo perdido com eventuais retransmissões causadas por colisão.

ESTABILIDADE - Capacidade de manter suas propriedades em qualquer condição de carga. Por exemplo, em alguns tipos de protocolos a vazão tende a zero se a carga na rede ultrapassa um determinado limite, caracterizando uma situação de instabilidade.

CUSTO/COMPLEXIDADE - Em muitas redes é mandatório que o custo e a complexidade das estações sejam baixos, resultando em uma limitação quanto a capacidade de processamento da estação dedicada à implementação da técnica de múltiplo acesso.

Outro parâmetro de avaliação é a habilidade do protocolo de suportar diferentes tipos de tráfego, com diferentes prioridades, diferentes comprimentos de mensagem e diferentes limites para o atraso de transferência dos pacotes.

A escolha do protocolo de múltiplo acesso mais adequado para uma dada rede deve considerar as características do meio de transmissão (ex., tempo de propagação), o número de estações na rede e a complexidade admissível para as mesmas, o custo de transmissão no canal, o perfil do tráfego a ser transportado pela rede e os requisitos de desempenho estabelecidos para a mesma.

Nos capítulos seguintes o desempenho de diversos protocolos é avaliado, considerando-se como parâmetros a vazão e o tempo de transferência de pacote. Como resultado da análise busca-se definir as limitações e potencialidades de cada protocolo e um indicativo de sua aplicação nas redes de telecomunicações atuais e futuras.

CAPÍTULO II - PROTOCOLOS BÁSICOS

Os protocolos de acesso podem ser classificados em cinco classes:

- Protocolos com Alocação Fixa
- Protocolos de Acesso Aleatório
- Protocolos com Alocação por Demanda com Controle Centralizado
- Protocolos com Alocação por Demanda com Controle Distribuído
- Protocolos Híbridos

Neste capítulo analisa-se o desempenho de alguns dos principais protocolos destas cinco classes, tomando-se como parâmetros a vazão e o atraso de transferência de pacote. Os protocolos foram escolhidos pela sua aplicabilidade em sistemas de telecomunicações atuais e por servirem de base para diversos protocolos propostos na literatura. A Figura 2.1 mostra um quadro sinóptico dos protocolos analisados em cada uma das cinco classes.

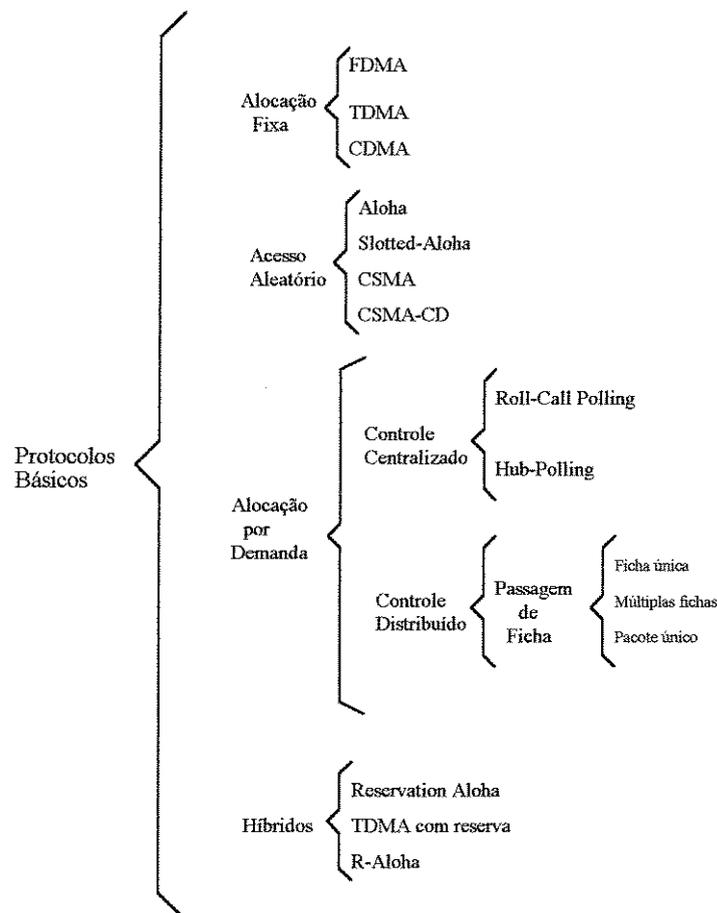


Figura 2.1 - Protocolos básicos analisados.

1. MÚLTIPLO ACESSO COM ALOCAÇÃO FIXA

Nas técnicas de múltiplo acesso com alocação fixa o canal (recurso) de comunicação é dividido em sub-canais, no domínio da frequência, do tempo, ou do código. Estes sub-canais são associados às estações da rede, e permanecem alocados às mesmas independentemente de sua estatística de tráfego, isto é, cada estação tem um sub-canal exclusivo para sua transmissão, quer ela tenha algo a transmitir ou não. Assim, caso uma dada estação não tenha pacotes a transmitir tem-se uma sub-utilização do recurso de comunicação, pela não utilização do canal a ela alocado. Por esta característica, as técnicas de acesso com alocação fixa não são adequadas para sistemas em que as estações gerem tráfego em rajadas (*burstys*) [Peyravi96] [Sachs88] [Raychaudhuri88].

Os principais protocolos de múltiplo acesso com alocação fixa são: Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (FDMA - *Frequency Division Multiple Access*), Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*) e Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA - *Code Division Multiple Access*).

1.1. MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA

Na técnica FDMA o recurso de comunicação compartilhado (o *transponder* de um satélite, por exemplo) é dividido em sub-canais, sendo que cada sub-canal ocupa uma banda de frequência e é alocado a uma estação. Uma estação que deseje efetuar uma transmissão pode fazê-lo a qualquer instante, utilizando o sub-canal a ela associado. Por razões de implementabilidade existe uma banda de guarda entre dois sub-canais adjacentes, resultando em perda de capacidade. A Figura 2.2 ilustra a idéia do compartilhamento do recurso de comunicação na técnica FDMA.

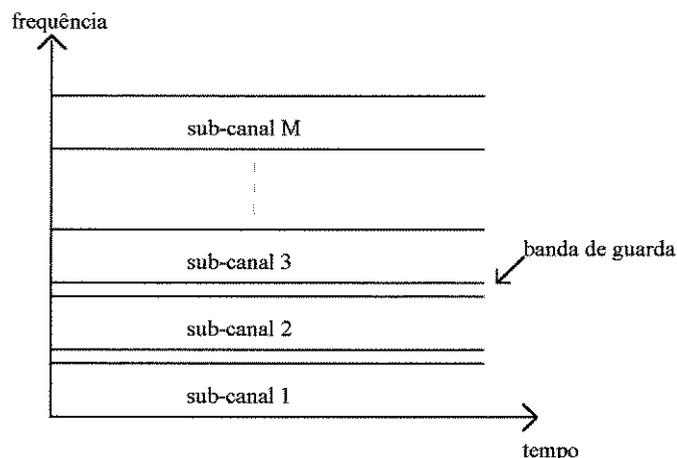


Figura 2.2 - Estrutura básica do FDMA.

Para a análise do desempenho do FDMA considera-se o modelo mostrado na Figura 2.3, onde fixa-se um canal com taxa de R bps compartilhado por M estações, cada uma podendo transmitir a uma taxa de R/M bps. Cada estação gera um tráfego *poissoniano* de λ pacotes por segundo, e cada pacote tem um comprimento médio de n bits. Considera-se que as estações possuem um *buffer* ilimitado.

O atraso médio de transferência de pacote é composto pelo tempo médio de transmissão do pacote, que é dado por Mn/R , mais o *tempo de sincronismo de janela de tempo*, que é o tempo médio que um pacote que está na cabeça da fila leva para ter o processo de transmissão iniciado, que é igual a zero para o FDMA, mais o *tempo médio que o pacote permanece na fila* (no *buffer* da estação), designado por $E\{W\}$.

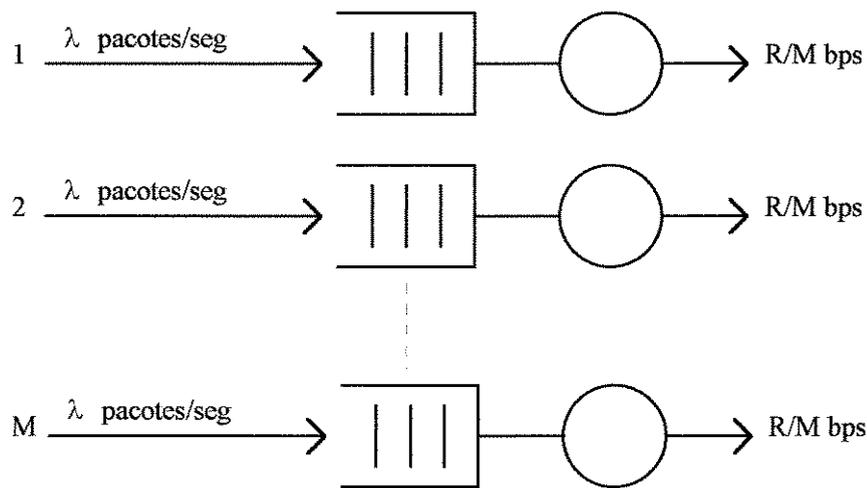


Figura 2.3 - Modelo para análise do FDMA.

O modelo para o comportamento do sistema representa M filas idênticas independentes, cujo valor de $E\{W\}$ é dado pela fórmula de Pollaczek-Khinchine [Kleinrock75]:

$$E\{W\} = \frac{\rho E\{T_s\}}{2(1-\rho)} \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{T_s}}{E\{T_s\}} \right]^2 \right\} \quad (2.1)$$

onde,

- $E\{T_s\}$ representa o *tempo médio de serviço*, ou tempo médio gasto pelo servidor para atender um cliente, que neste caso representa o tempo médio de transmissão de um pacote.

$$E\{T_s\} = \frac{Mn}{R} \quad (2.2)$$

- σ_{T_s} representa o desvio padrão do tempo de serviço.

- ρ representa o *fator de utilização* de cada servidor, que no caso é o canal de comunicação associado a cada estação. O fator de utilização representa o percentual de tempo em que o canal está ocupado transmitindo pacotes, e é calculado por

$$\rho = \frac{\lambda \cdot n}{R/M} = \frac{Mn\lambda}{R} \quad (2.3)$$

Pacotes de tamanho fixo ($\sigma_{Ts} = 0$) resultam no menor tempo médio de enfileiramento. Neste caso o sistema com fila é denominado de sistema M/D/1, resultando em:

$$E\{W\} = \frac{M\rho}{2(1-\rho)} \left(\frac{n}{R} \right) \quad (2.4)$$

O atraso médio de transferência de pacote, sem considerar o tempo de propagação no enlace, é dado por:

$$E\{T\} = \frac{Mn}{R} + \frac{M\rho}{2(1-\rho)} \left(\frac{n}{R} \right) \quad (2.5)$$

Normalizando (2.5) em relação a n/R obtém-se:

$$E\{T_N\} = M + \frac{M\rho}{2(1-\rho)} = \frac{M(2-\rho)}{2(1-\rho)} \quad (2.6)$$

O fator de utilização ρ representa o número total de pacotes transmitidos ($M\lambda$ pacotes/seg) dividido pela capacidade máxima do sistema (R/n pacotes/seg). Logo, ρ representa o percentual de tempo em que o canal está ocupado transmitindo pacotes. Desconsiderando-se os efeitos do protocolo implementado e considerando-se o canal livre de erros, ρ representa a vazão normalizada do sistema, aqui denominada de S .

Da expressão (2.5) verifica-se que a máxima vazão normalizada para o sistema FDMA é 1.

1.2. MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE TEMPO

Na técnica TDMA o tempo é dividido em períodos sucessivos chamados de *quadros*. Cada quadro é composto de M janelas sucessivas, e cada janela de tempo é alocada a uma estação. Cada estação da rede só pode transmitir durante sua janela de tempo, podendo haver um tempo de espera entre o instante em que uma estação deseja transmitir e o instante em que ela pode começar a fazê-lo. A Figura 2.4 ilustra o compartilhamento do canal de comunicação na técnica TDMA, onde se mostra M janelas de tempo de um quadro.

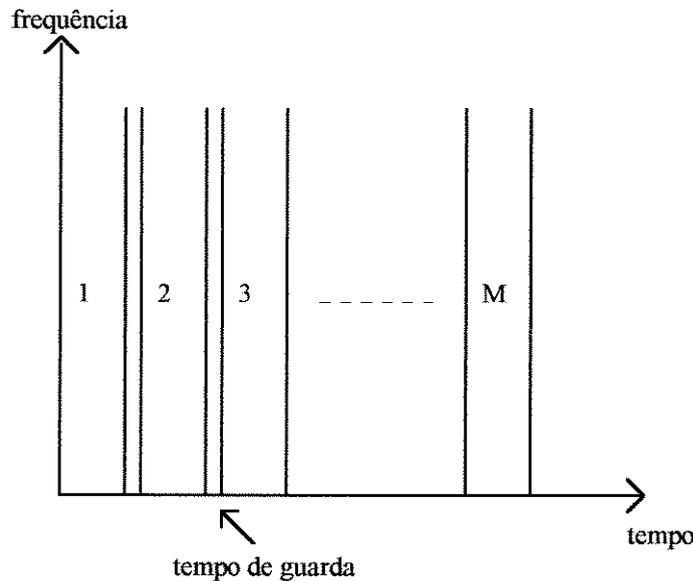


Figura 2.4 - Estrutura básica do TDMA.

O modelo para análise da técnica TDMA é igual ao mostrado na Figura 2.3 para o FDMA. As estações transmitem a uma taxa de R bps, mas apenas por uma fração de $1/M$ do tempo. Logo, as expressões para a utilização de servidor, tempo de serviço e, conseqüentemente, tempo médio de espera na fila, são idênticas àsquelas válidas para a técnica FDMA.

O tempo de transmissão do pacote no TDMA é dado por n/R . O tempo médio de sincronismo de janela de tempo, admitindo chegada aleatória, é a metade do tempo de quadro, e é dado por $Mn/2R$. Logo, o atraso médio de transferência de pacote, desconsiderando-se o tempo de propagação, para pacotes de tamanho fixo e estações com *buffer* ilimitado, é dado por:

$$E\{T\} = \frac{n}{R} + \frac{Mn}{2R} + \frac{M\rho}{2(1-\rho)} \left(\frac{n}{R}\right) \quad (2.7)$$

e o atraso normalizado com relação a n/R é:

$$E\{T_N\} = 1 + \frac{M}{2} + \frac{M\rho}{2(1-\rho)} \quad (2.8)$$

A vazão normalizada do sistema TDMA é dada pela expressão (2.3). O limite máximo da vazão é 1.

O tempo médio para transferência de um pacote em uma rede com mais de duas estações é sempre menor no TDMA do que no FDMA, mostrando a superioridade da técnica TDMA neste aspecto.

$$E\{T_N\}_{FDMA} = E\{T_N\}_{TDMA} + \left(\frac{M}{2} - 1\right) \quad (2.9)$$

A Figura 2.5 mostra o atraso médio normalizado obtido para as técnicas FDMA e TDMA em função de ρ e do número de estações na rede.

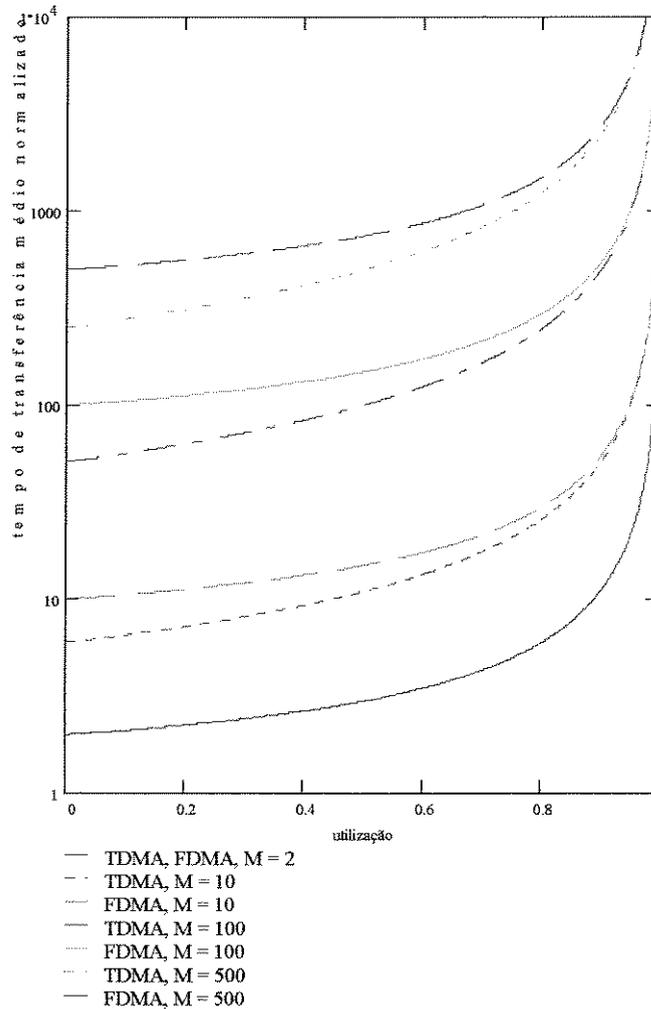


Figura 2.5 - Atraso médio de transferência normalizado dos sistemas FDMA e TDMA.

1.3. MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE CÓDIGO - CDMA

Em um sistema com espalhamento espectral (*spread-spectrum*) as diversas estações utilizam a mesma frequência de portadora e ocupam a mesma faixa de frequência. A largura de faixa ocupada pelo sinal é muito maior do que a mínima necessária para sua transmissão, sendo o processo de espalhamento realizado por meio de um código independente dos dados.

A Figura 2.6 ilustra um modelo simplificado de um sistema de comunicação digital utilizando espalhamento espectral. O sinal de entrada, $a(t)$, é multiplicado por uma sequência $b(t)$ pseudo-aleatória (denominada sequência PN - *Pseudo-Noise*), gerando o sinal $c(t)$. O receptor detecta o sinal $a(t)$ a partir da correlação do sinal recebido, $r(t) = c(t) + n(t)$, com $b(t)$. Assim, na recepção, é necessária a sincronização da sequência PN gerada localmente com a sequência contida no sinal recebido [Pickholtz82].

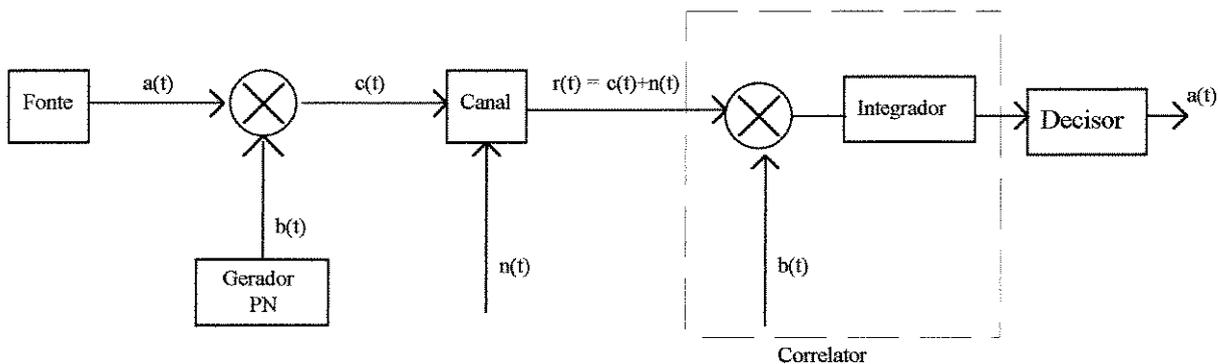


Figura 2.6 - Estrutura básica de um sistema com espalhamento espectral.

A utilização do espalhamento espectral é feita com os seguintes objetivos:

- Combater ou suprimir os efeitos devidos a interferência intencional (*jamming*), a interferência causada por outros usuários do canal, e a auto-interferência devido a propagação multipercurso.
- Ocultar o sinal, transmitindo-o com baixos níveis de potência, fazendo com que um receptor não autorizado tenha dificuldade de recebê-lo na presença de ruído de fundo.
- Prover privacidade para a comunicação, na presença de outros receptores.

As duas técnicas usuais para gerar o sinal com espalhamento espectral são denominadas de Sequência Direta (*Direct Sequence - DS*) e Salto de Frequência (*Frequency Hopping - FH*). Este trabalho aborda apenas a técnica de sequência direta.

O sinal de entrada (informação) possui uma taxa de R_i bps, sendo $T_b = 1/R_i$ a duração de um bit. Esta sequência é combinada com uma sequência binária pseudo-aleatória que possui uma taxa de R chips por segundo, onde um *chip* é um pulso retangular da sequência PN, e $T_c = 1/R$ é a duração do pulso ou intervalo de *chip*. A relação $\beta = T_b/T_c$ corresponde ao número de *chips* por bit. A Figura 2.7 ilustra estes parâmetros.

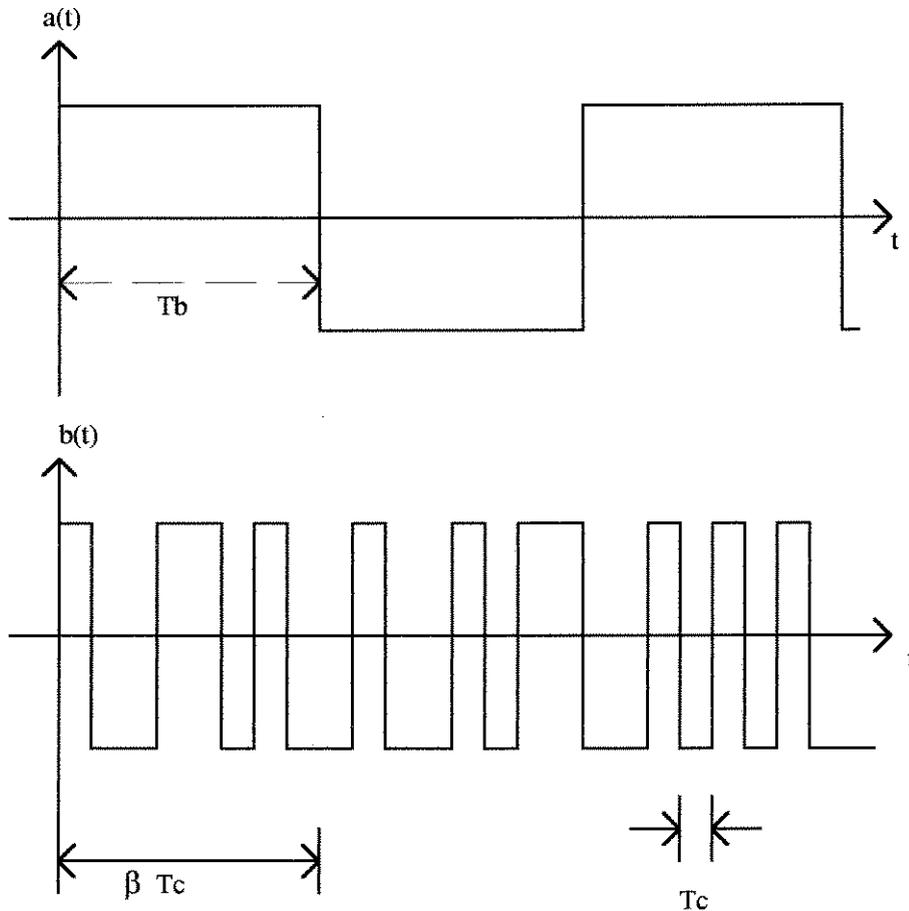


Figura 2.7 - Parâmetros de um sistema com espalhamento espectral.

A seqüência combinada modula uma portadora, que é então transmitida. O fator de expansão da largura de faixa, denominado ganho de processamento (β), é dado pela relação entre R e R_i . Uma réplica da seqüência PN deve ser gerada, de forma síncrona, no receptor, para que o processo de espalhamento espectral possa ser revertido e a informação original recuperada.

No CDMA cada usuário possui uma seqüência PN própria para gerar o sinal com espalhamento espectral, sendo as seqüências (idealmente) ortogonais entre si. Para um sistema com M estações transmitindo simultaneamente, admitindo-se que o receptor recebe o mesmo nível P de potência de todos os transmissores, e contabilizando-se a interferência como ruído térmico aditivo, tem-se a seguinte relação Sinal/Ruído (SNR) [Gilhousen91]:

$$SNR = \frac{P}{(M-1)P + N} \quad (2.10)$$

onde N é a potência de ruído térmico no canal.

Em termos da relação entre a energia de bit e a densidade de ruído tem-se:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W/R_t}{\frac{N}{P} + (M-1)} \quad (2.11)$$

onde W é a largura de faixa do canal.

O número de estações suportado pelo sistema, para uma dada relação E_b/N_0 , é:

$$M = 1 + \frac{W/R_t}{E_b/N_0} - \frac{N}{P} \quad (2.12)$$

Admitindo-se que o ruído térmico no canal é muito menor do que o nível de potência interferente no receptor, tem-se:

$$M \cong 1 + \frac{W/R_t}{E_b/N_0} \quad (2.13)$$

A relação E_b/N_0 apropriada é função do tipo de modulação utilizado e da taxa de erro de bit admissível para o sistema.

Para a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) com detecção coerente, tem-se que a probabilidade de erro de bit é dada por [Sklar88]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (2.14)$$

onde a função Q é calculada por

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (2.15)$$

podendo ser aproximada, quando $x > 3$, para:

$$Q(x) \cong \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2.16)$$

A probabilidade de erro de bit em um sistema CDMA com modulação BPSK é dada por:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2W/R_i}{M-1}}\right) \quad (2.17)$$

Para uma rede com M estações, a vazão máxima é MR_i e ocorre quando todas as estações transmitem simultaneamente. A vazão normalizada para o canal CDMA é:

$$S = \frac{MR_i}{R} \quad (2.18)$$

De (2.17) observa-se que a taxa de erro de bit aumenta à medida que a relação $(2W/R_i)/(M-1)$ diminui. Para M grande, e considerando-se que a eficiência de largura de faixa da modulação BPSK é igual a 1, ou seja $W = R$, tem-se:

$$\frac{2W/R_i}{M-1} \cong \frac{2}{S} \quad (2.19)$$

e a probabilidade de erro de bit pode então ser aproximada por:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2}{S}}\right) \quad (2.20)$$

Portanto, a probabilidade de erro de bit cresce com o aumento da vazão, como mostra a Figura 2.8.

A presente análise considerou que a estação receptora recebe o sinal desejado e os (M-1) sinais interferentes com a mesma potência P. Para obter-se esta característica é necessário a implementação de complexos sistemas de controle de potência, particularmente se as estações forem móveis. Imperfeições no controle de potência fazem com que o nível de potência recebido não seja o mesmo para todos os transmissores, acarretando uma diminuição na capacidade do sistema. Existem várias outras formas de se aumentar a capacidade do sistema, como por exemplo através do uso de codificação para correção automática de erro, do uso de antenas setorizadas, e da supressão da portadora nos momentos de inatividade do transmissor, sendo esta última particularmente eficaz em sistemas de comunicação de voz, onde a taxa de atividade do locutor é da ordem de 35% a 40% [Gilhousen91] [Hui84] [Weber81].

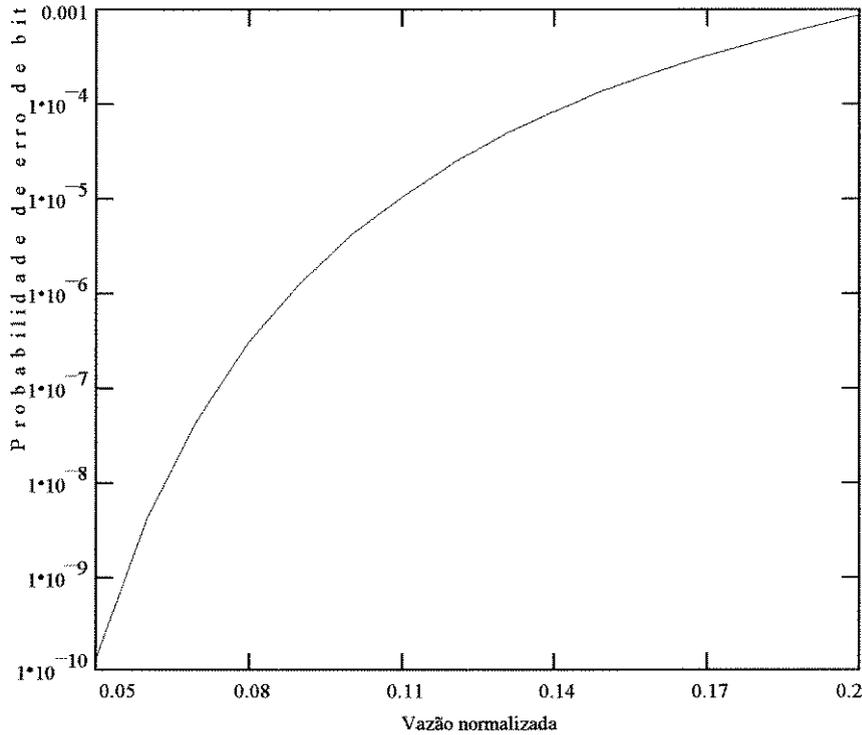


Figura 2.8 - Probabilidade de erro de bit versus Vazão normalizada do canal CDMA com modulação BPSK.

Se o tráfego gerado em cada estação é determinístico e contínuo, as estações transmitem o tempo todo, e o atraso de transferência de pacote é calculado por n/R_i .

Se o tráfego é aleatório, a análise do tempo de transferência de um pacote segue modelo semelhante àquele utilizado para o múltiplo acesso FDMA, uma vez que as estações podem transmitir a qualquer instante, pois cada estação tem associado a si um canal com capacidade máxima de vazão de R_i bps. Assim, considerando-se que a taxa de chegada dos pacotes em cada estação é λ , que cada pacote possui um comprimento fixo de n bits, e desprezando-se os erros de transmissão, tem-se:

$$E\{T\} = \frac{n}{R_i} + \frac{\rho}{2(1-\rho)} \left(\frac{n}{R_i} \right) \quad (2.21)$$

Onde ρ representa o fator de utilização associado a cada estação, e é dado por:

$$\rho = \frac{\lambda n}{R_i} \quad (2.22)$$

Considerando X o número de estações transmitindo simultaneamente em um dado instante e admitindo-se que todas as estações estejam igualmente carregadas, a probabilidade de x estações transmitirem simultaneamente em uma rede com m estações, é dada por:

$$P(X = x) = \text{comb}(m, x) \cdot \rho^x \cdot (1 - \rho)^{m-x} \quad (2.23)$$

$$\text{com comb}(m, x) = \frac{m!}{x!(m-x)!}$$

Se $X \leq M$, a probabilidade de erro de bit é menor ou igual à máxima especificada. Se $X > M$, a probabilidade de erro de bit ultrapassa a especificada. A confiabilidade da rede, definida como a probabilidade da taxa de erro de bit estar abaixo do limite especificado, é dada por:

$$C = 1 - P(X > M) = P(X \leq M) = \sum_{j=0}^M \text{comb}(m, j) \cdot \rho^j \cdot (1 - \rho)^{m-j} \quad (2.24)$$

Se a rede admite que a taxa de erro de bit supere o especificado com uma certa confiabilidade, o número máximo de estações permitidas na rede é maior que o número máximo de estações nas condições nominais (onde a taxa de erro de bit máxima não é ultrapassada), e é função do fator de utilização de cada estação.

Por exemplo, em uma rede onde a taxa de erro de bit máxima é alcançada com 10 estações transmitindo simultaneamente, o número máximo de estações admissível, para uma confiabilidade $C = 0.99$, é dado, em função de ρ , por:

ρ	M
0.1	50
0.2	26
0.3	18
0.4	15
0.5	12
0.6	11
0.7	10

2. MÚLTIPLO ACESSO ALEATÓRIO

Nas técnicas de múltiplo acesso aleatório não existe coordenação entre as estações. Uma estação que deseje transmitir decide localmente se pode fazê-lo ou não, e se o faz utiliza toda a largura de faixa do canal de comunicação. É possível que duas ou mais estações tenham utilizado o canal ao mesmo tempo, resultando na *colisão* de seus pacotes. Se uma colisão ocorre, as estações retransmitem seus pacotes após um intervalo de tempo aleatório, para evitar que ocorram colisões sucessivas. A colisão pode ser detectada pelo não recebimento de uma mensagem de reconhecimento positiva do receptor ou através de mecanismos de transmissão e escuta simultânea do meio.

As técnicas de acesso aleatório são adequadas para redes com baixo tráfego, onde a probabilidade de colisão é baixa. Se a carga do sistema é aumentada, o tempo para transferência do pacote cresce e a vazão cai significativamente. Os principais protocolos de acesso aleatório são os da classe *Aloha* e os da classe CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*).

2.1. MÚLTIPLO ACESSO ALOHA

Na técnica de acesso denominada *Aloha Puro* as estações transmitem no instante que desejarem, sem se importar com as demais estações da rede. Após transmitir um pacote a estação passa a aguardar uma mensagem de reconhecimento positivo por parte do receptor. Caso esta mensagem não seja recebida dentro de um intervalo de tempo denominado *timeout*, uma colisão é caracterizada, e a estação retransmite após um intervalo aleatório de tempo.

Admitindo-se que o tráfego no canal é poissoniano, a vazão normalizada é dada por [Abramson77] :

$$S = Ge^{-2G} \quad (2.25)$$

onde,

- S é o número médio de bits transmitidos com sucesso por segundo dividido pela taxa de transmissão no canal, definido como vazão normalizada.
- G é o número médio de bits transmitidos com e sem sucesso por segundo dividido pela taxa de transmissão no canal, definido como carga total normalizada.

A máxima vazão possível em uma rede *Aloha* é $S_{\max} = 0.184$.

O atraso médio de transferência de pacote é composto do tempo médio de transmissão do pacote (τ), do tempo médio gasto com retransmissões devido a colisões $E\{T_r\}$, e do tempo necessário para o transmissor ter a confirmação da entrega correta do pacote ou da ocorrência de uma colisão (σ).

Admitindo-se que em caso de colisão as estações gerem um atraso aleatório uniformemente distribuído entre 1 e K intervalos de τ segundos, o tempo médio perdido a cada retransmissão é

$$E\{T_r\} = \left(\frac{K+1}{2}\right)\tau + \sigma \quad (2.26)$$

Se $K \gg 1$, o número médio de retransmissões para cada pacote transmitido com sucesso pode ser considerado independente de K. O número médio de retransmissões por pacote transmitido com sucesso é $(G/S - 1) = e^{2G} - 1$, e

$$E\{T_r\} = (e^{2G} - 1) \left(\left(\frac{K+1}{2}\right)\tau + \sigma\right) \quad (2.27)$$

O atraso de transferência de pacote é dado por:

$$E\{T\} = \tau + \sigma + (e^{2G} - 1) \left(\left(\frac{K+1}{2}\right)\tau + \sigma\right) \quad (2.28)$$

No caso das estações poderem escutar suas próprias transmissões, a mensagem de reconhecimento torna-se desnecessária, e o valor de σ se resume ao tempo de propagação na rede (t_p).

2.2. MÚLTIPLO ACESSO SLOTTED ALOHA

É possível aumentar a vazão máxima da técnica *Aloha* introduzindo-se sincronismo entre as estações. Na técnica denominada *Slotted Aloha* o tempo é dividido em janelas com duração idêntica ao tempo de transmissão de pacote. As estações transmitem seus pacotes sem se preocuparem se existem outras estações transmitindo, só o fazendo no início de uma janela de tempo.

Em uma rede com M estações, a relação entre vazão e carga é dada por [Abramson77]:

$$S = G \left(1 - \frac{G}{M}\right)^{M-1} \quad (2.29)$$

Considerando-se um número infinito de estações tem-se:

$$S = Ge^{-G} \quad (2.30)$$

A Figura 2.9 mostra S x G dado pela expressão (2.29) considerando-se $M = 10$, $M = 100$ e $M = \infty$.

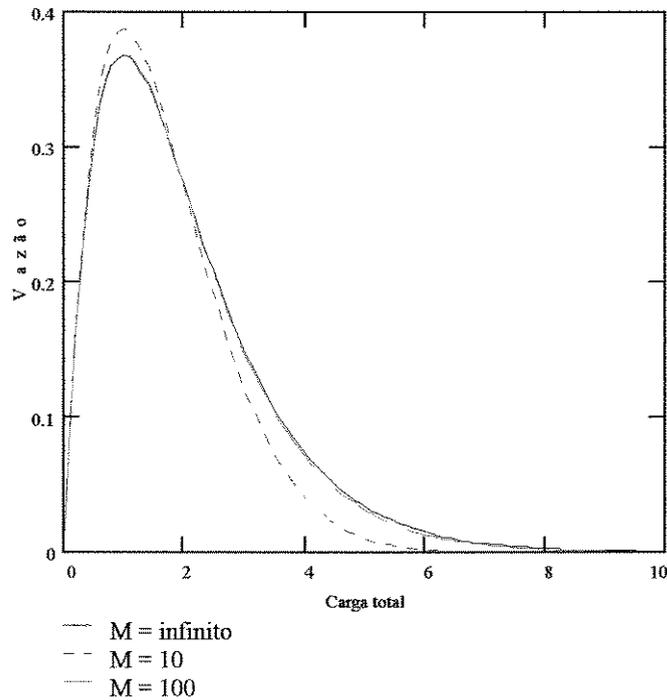


Figura 2.9 - Vazão x Carga total para *Slotted Aloha* com $M = 10$, $M = 100$ e $M = \infty$.

A máxima vazão possível é 0.368, ocorrendo para $G = 1$.

A Figura 2.10 permite a comparação do comportamento Vazão x Carga para os sistemas *Aloha* e *Slotted Aloha*.

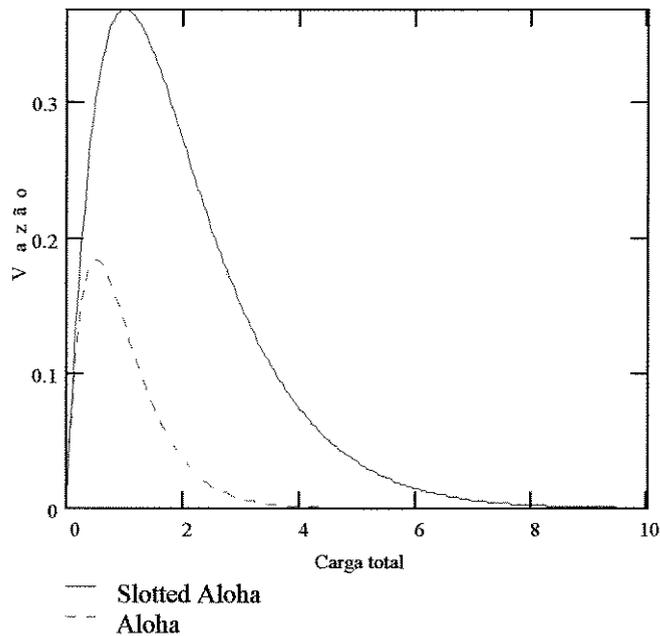


Figura 2.10 - Vazão x Carga para *Aloha* e *Slotted Aloha*.

O cálculo do atraso de transferência de pacote é semelhante ao utilizado para a técnica *Aloha* Puro, com a diferença que no *Slotted Aloha* a cada pacote transmitido (ou retransmitido) perde-se um tempo médio adicional igual a metade do tamanho da janela, pois o início de transmissão de um pacote obrigatoriamente deve coincidir com o início de uma janela. Assim, tem-se:

$$E\{T\} = \frac{3}{2}\tau + \sigma + (e^\sigma - 1) \left(\left(\frac{K+1}{2} \right) \tau + \frac{1}{2}\tau + \sigma \right) \quad (2.31)$$

A Figura 2.11 mostra a comparação entre o atraso de transferência de pacote (normalizado em relação ao tempo de transmissão do pacote) nas técnicas *Aloha* e *Slotted Aloha*, para uma rede onde $\sigma = 30\tau$, e $K = 5$. Nota-se a superioridade da técnica *Slotted Aloha*, a não ser para valores de vazão muito baixos.

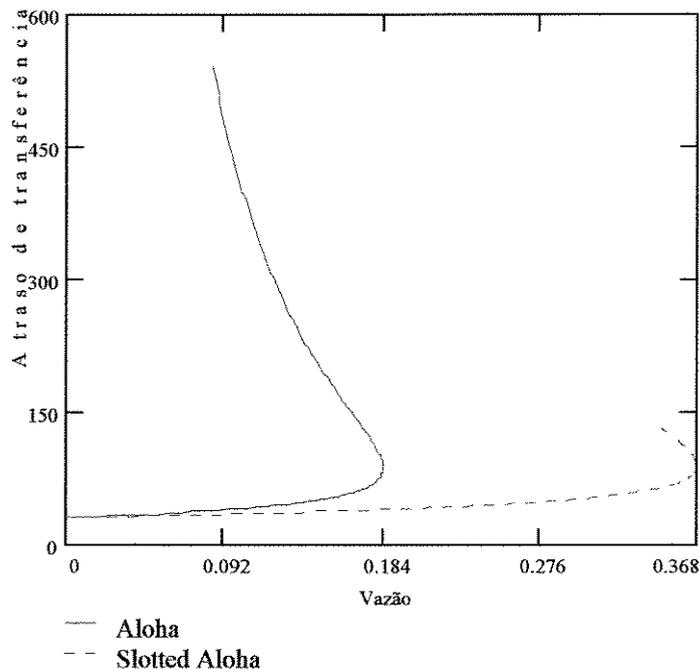


Figura 2.11 - Atraso de transferência de pacote nas técnicas *Aloha* e *Slotted Aloha*, com $\sigma = 30\tau$ e $K = 5$.

A Figura 2.12 compara o desempenho do *Slotted Aloha*, para $K=5$, com o TDMA para $M = 10$ e $M = 100$ estações. Em ambos os casos considerou-se o tempo de propagação igual a 30τ . Quando o número de estações é grande, o *Slotted Aloha* possui desempenho superior em praticamente toda a faixa de vazão na qual ele é estável. Para pequenos valores de M , o TDMA pode apresentar desempenho superior.

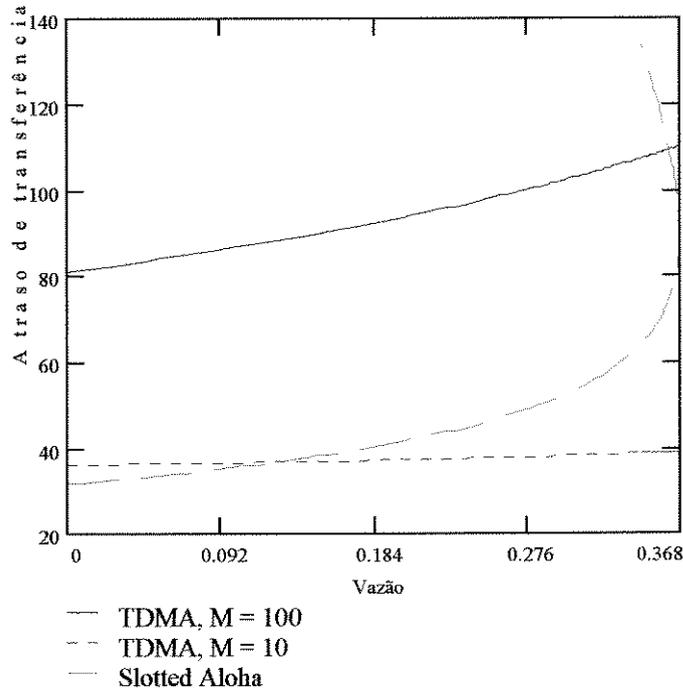


Figura 2.12 - Atraso de transferência de pacote entre o TDMA e o *Slotted Aloha*.

2.3. CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS (CSMA)

Os protocolos CSMA podem ser considerados um refinamento dos protocolos *Aloha*. No CSMA as estações escutam o meio antes de transmitir, e só o fazem se detectarem o meio livre. Assim como no *Aloha*, a operação dos protocolos CSMA pode ser com divisão do tempo em janelas (*slotted CSMA*) ou não (*unslotted CSMA*).

Os protocolos CSMA podem ser classificados em três tipos básicos:

- **NÃO-PERSISTENTE:** a estação escuta o meio e transmite se o mesmo está livre. Se o meio está ocupado a estação aguarda um determinado tempo antes de escutar o meio novamente.
- **P-PERSISTENTE:** o tempo é dividido em janelas com tamanho igual ao tempo de propagação na rede (t_p). Uma estação que deseja transmitir escuta o meio, se o mesmo estiver livre ela transmite com probabilidade p . Quando não transmite a estação gera um atraso igual a t_p e volta a escutar o meio novamente. Se o meio é então detectado como livre o procedimento anterior se repete; se o meio está ocupado a estação reinicia a tentativa de transmissão após um atraso aleatório. Se o meio foi detectado como ocupado na primeira escuta, a estação aguarda até que o mesmo fique livre, quando então o procedimento anterior é executado.
- **1-PERSISTENTE:** é um caso particular do p-persistente onde $p = 1$, ou seja, a estação escuta o meio e transmite se o mesmo estiver livre. Se o meio estiver ocupado, a estação aguarda até que o mesmo se torne livre, quando então transmite.

Em qualquer variante, a ocorrência de uma colisão é detectada pela ausência da mensagem de reconhecimento positivo e, neste caso, as estações participantes geram um atraso aleatório antes de escutarem o meio para a retransmissão do pacote.

As características de vazão e atraso destes protocolos foram analisadas por Kleinrock e Tobagi em [Kleinrock75b]. Os resultados obtidos mostram que o desempenho é fortemente dependente do tempo de propagação na rede. As expressões (2.32) e (2.33) mostram a relação entre S e G para o protocolo CSMA não-persistente *unslotted* e *slotted*, respectivamente. A Figura 2.13 mostra o comportamento $S \times G$ em função do tempo de propagação na rede normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote, a , para os dois protocolos.

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}} \quad (2.32)$$

$$S = \frac{aGe^{-aG}}{(1 - e^{-aG}) + a} \quad (2.33)$$

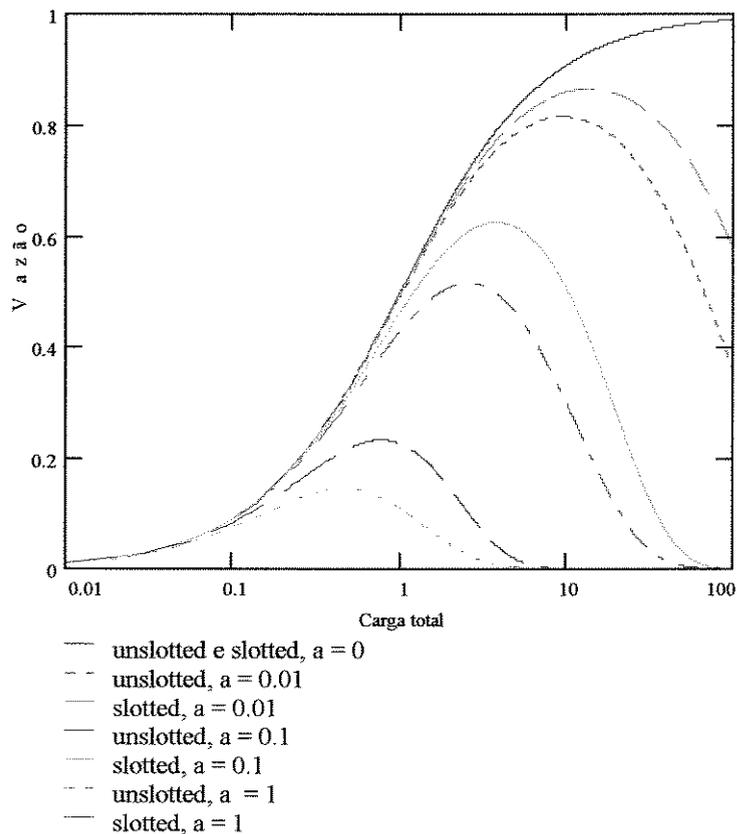


Figura 2.13 - Vazão versus Carga para CSMA não-persistente *slotted* e *unslotted*.

Das expressões (2.32) e (2.33) e da Figura 2.13 conclui-se:

- A vazão do CSMA não-persistente pode ser pior do que a do protocolo *Aloha*, se o tempo de propagação for da ordem de grandeza ou maior que o tempo de transmissão do pacote. Esta característica também ocorre para os outros protocolos CSMA e limita a utilização deste tipo de protocolo em redes de comunicação por satélite, onde o tempo de propagação é normalmente bem superior ao tempo de transmissão do pacote.
- A implementação *slotted* apresenta desempenho superior à *unslotted*, ao custo de uma maior complexidade. A medida em que o tempo de propagação na rede diminui, esta diferença de desempenho tende a desaparecer. No limite, quando $a = 0$, os dois tipos de implementação possuem o mesmo desempenho.

A vazão para a técnica 1-persistente *unslotted* é [Kleinrock75b]:

$$S = \frac{G[1 + G + aG(1 + G + aG/2)] \cdot e^{-G(1+2a)}}{G(1+2a) - (1 - e^{-aG}) + (1 + aG) \cdot e^{-G(1+a)}} \quad (2.34)$$

A Figura 2.14 compara o comportamento vazão x carga total das técnicas não-persistente e 1-persistente, ambas *unslotted*. Pode-se observar que:

- A técnica não-persistente apresenta uma vazão máxima maior.
- Dentro da região de estabilidade da técnica 1-persistente, esta técnica apresenta uma maior vazão.
- A técnica 1-persistente é menos sensível a variações no valor de a .

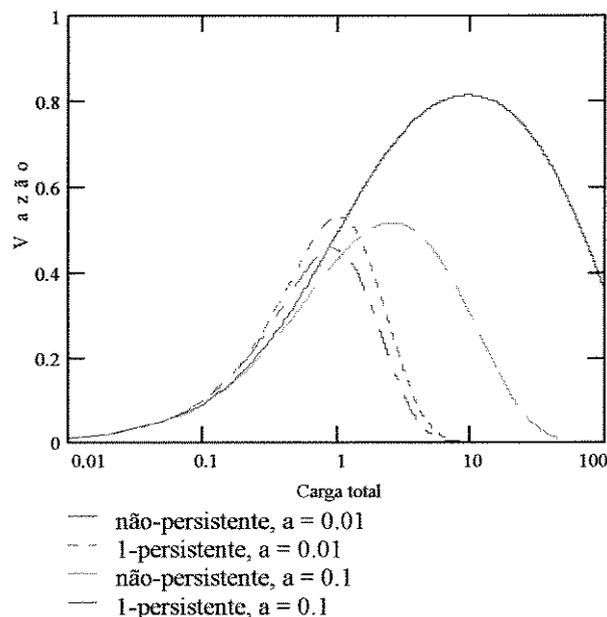


Figura 2.14 - Vazão x Carga total para CSMA *unslotted*, não-persistente e 1-persistente.

2.4. CSMA COM DETECÇÃO DE COLISÃO (CSMA-CD)

A diferença do CSMA para o CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) está na forma como as colisões são detectadas. No CSMA-CD as estações permanecem escutando o meio durante sua transmissão para detectar possíveis colisões. Se uma colisão ocorre, as estações abortam a transmissão de seus pacotes, transmitem um sinal de reforço de colisão, e geram um atraso aleatório, após o qual as estações voltam a escutar o meio para uma tentativa de retransmissão do pacote. A transmissão do sinal de reforço de colisão garante que todas as estações que participaram da colisão a perceberam. Para garantir que as estações possam perceber se seus pacotes sofreram colisão, os mesmos devem ter um comprimento mínimo igual a duas vezes o máximo tempo de propagação na rede. Se a mensagem a ser transmitida tem um comprimento menor do que o mínimo, a estação deve completar o tamanho do pacote acrescentando o número necessário de bits de enchimento (chamados *pad*) [Bux84].

As formas de implementação do CSMA-CD são similares às do CSMA, ou seja, não-persistente, p-persistente e 1-persistente, com divisão do tempo em janelas (*slotted*) ou não (*unslotted*).

Takagi e Kleinrock analisaram em [Takagi85] a vazão das técnicas CSMA-CD persistentes (*slotted e unslotted*) considerando um número finito e infinito de usuários. Sohraby, Molle e Venetsanopoulos [Sohraby87] utilizaram uma abordagem mais simples para analisar os protocolos CSMA e CSMA-CD 1-persistente *unslotted*, e mostraram um erro na expressão de Takagi e Kleinrock para a vazão em uma rede CSMA-CD 1-persistente *unslotted* com número infinito de estações. Takagi e Kleinrock corrigiram sua expressão em [Takagi87], chegando ao mesmo resultado mostrado por Sohraby.

A expressão (2.35) permite calcular a vazão (S) em função da carga total (G) para o CSMA-CD *unslotted* não-persistente, considerando-se uma rede com infinitas estações [Keiser89][Hammond86].

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{Ge^{-aG} + \gamma aG(1 - e^{-aG}) + 2aG(1 - e^{-aG}) + (2 - e^{-aG})} \quad (2.35)$$

Na expressão (2.35) γ representa o tempo de transmissão do reforço de colisão normalizado em relação ao tempo de propagação.

A Figura 2.15 compara a vazão obtida no CSMA e no CSMA-CD (não-persistente, *unslotted*), mostrando que a utilização da detecção de colisão através da escuta do meio resulta em um aumento na vazão do sistema. No CSMA-CD tem-se um menor tempo médio perdido entre o início da transmissão de um pacote que sofreu colisão e o início do processo de retransmissão de tal pacote, pelo fato de se detectar a colisão mais rapidamente.

O atraso médio de transferência de pacote para o CSMA-CD 1-persistente *unslotted*, normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote, considerando-se pacotes de comprimento constante é [Bux81]:

$$E\{T_N\} = \rho \cdot \frac{[1 + (4e + 2)a + 5a^2 + 4e(2e - 1)a^2]}{2\{1 - \rho[1 + (2e + 1)a]\}} + 1 + 2ea - \frac{(1 - e^{-2a\rho})\left(\frac{2}{\rho} + 2ae^{-1} - 6a\right)}{2[e^{-\rho(1+a)+1} - 1 + e^{-2\rho a}]} + \frac{a}{2} \quad (2.36)$$

O valor máximo da vazão é:

$$\rho_{max} = \frac{1}{[1 + (2e + 1)a]} \cong \frac{1}{(1 + 6.44a)} \quad (2.37)$$

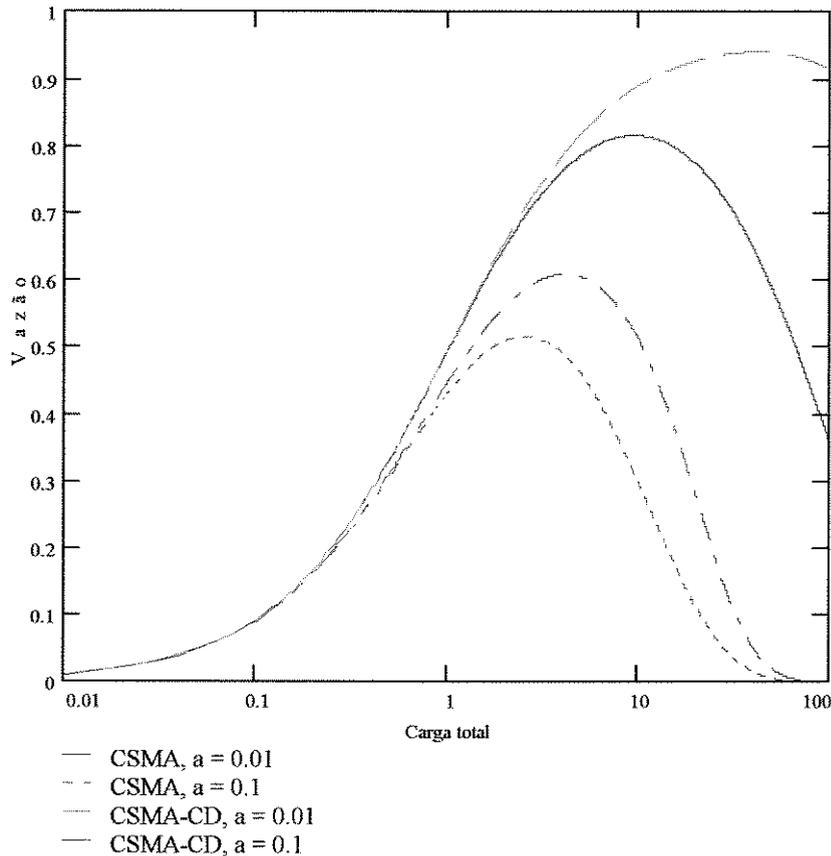


Figura 2.15 - Vazão para as técnicas CSMA não-persistente e CSMA-CD não persistente com $\gamma = 1$.

Para um dado valor de utilização máxima, não é possível aumentar o tamanho da rede (aumentar o tempo de propagação) sem diminuir a taxa de transmissão, nem tampouco aumentar a taxa de transmissão sem diminuir o tamanho da rede. Isto mostra uma limitação da técnica de acesso CSMA-CD.

3. MÚLTIPLO ACESSO COM ALOCAÇÃO POR DEMANDA E CONTROLE CENTRALIZADO

As técnicas de múltiplo acesso com alocação por demanda formam uma classe de protocolos de acesso em que não há colisão e onde as estações utilizam o recurso de comunicação de acordo com sua necessidade de tráfego. Portanto, não há perda de recurso de comunicação com colisões ou com estações que não tenham mensagens a transmitir.

Nos protocolos de acesso com alocação por demanda as estações devem fornecer, explícita ou implicitamente, informações sobre suas necessidades de transmissão. Nas técnicas com controle centralizado uma estação central é responsável por analisar estas informações e alocar a capacidade de transmissão necessária a cada estação. A estação central, chamada de estação primária, é responsável por controlar o acesso ao meio das demais estações da rede, denominadas estações secundárias. O problema da colisão não existe, pois o protocolo garante que uma única estação estará transmitindo a um dado instante.

A principal técnica de acesso com esta característica é o *Polling*, com suas variantes *roll-call polling* e *hub polling*. As redes de computadores de primeira geração baseiam-se em computadores centrais (*hosts*) compartilhados por terminais passivos com capacidade de processamento limitada. Nestas redes a técnica de acesso comumente utilizada é o *polling*. Com a evolução da microinformática e o aumento da capacidade de processamento e armazenamento dos terminais (PCs), as técnicas com controle distribuído ou aleatórias passaram a ser utilizadas nas redes locais, em detrimento do *polling*. Recentemente, a técnica de *polling* voltou a ser considerada como opção para a implementação das redes ATM *wireless* [Kubbar97] [Mahmoud96].

3.1. ROLL-CALL POLLING

As estações secundárias só podem transmitir para a estação primária e após autorizadas pela mesma. A autorização se dá através de uma mensagem especial denominada mensagem de *polling*. As mensagens de *polling* são enviadas sequencialmente, estação por estação, segundo uma ordem definida. A reação de uma estação secundária ao recebimento de uma mensagem de *polling* depende de seu *status*; se possui dados para transmitir ela o faz até que seu *buffer* esteja vazio (para implementação com serviço exaustivo), se não tem dados para transmitir, ela envia de volta à estação primária uma mensagem de controle. Após o término da transmissão da estação secundária, a estação primária envia a mensagem de *polling* para a próxima estação da seqüência, e assim sucessivamente.

O acesso através de *polling* pode ser feito com várias configurações de rede. A rede multiponto, ilustrada na Figura 2.16, possui dois canais, denominados canal de entrada (*inbound*) e canal de saída (*outbound*). A estação primária envia mensagens pelo canal de saída e recebe pelo canal de entrada. Como os canais são independentes, é permitido à estação primária enviar uma mensagem para uma estação secundária enquanto recebe mensagens de outra estação secundária. Toda a comunicação é feita passando-se pela estação primária, não havendo comunicação direta entre duas estações secundárias.

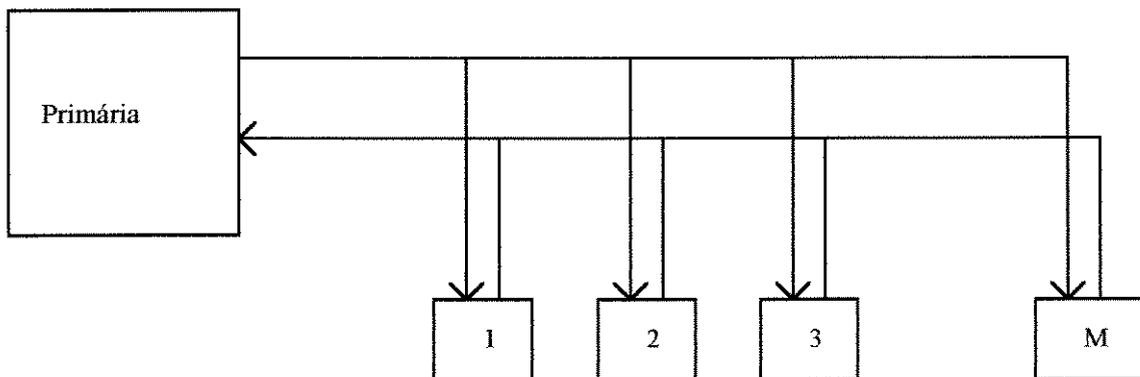


Figura 2.16 - Rede multiponto para sistemas com polling.

3.2. HUB POLLING

Nesta técnica a estação primária envia a mensagem de *polling* para a estação na extremidade da linha multiponto (estação M da Figura 2.16), autorizando-a a transmitir. Após o término da transmissão, ou imediatamente, se não houver informação a transmitir, a estação transfere, através de uma mensagem de controle, o direito de transmissão para a próxima estação da seqüência de *polling* (estação M-1). Desta forma, o direito de transmissão vai sendo transferido seqüencialmente de estação para estação, até que ele chegue à estação 1, que após sua transmissão transfere o controle de volta à estação primária. Um novo ciclo se inicia com a estação primária enviando a mensagem de *polling* para a estação M e assim por diante.

A vantagem do *hub polling* sobre o *roll-call polling* é que o direito de transmissão é transferido de uma estação secundária para outra mais rapidamente, resultando num incremento do desempenho. A desvantagem é que as estações secundárias devem ouvir também o canal de entrada, para poderem identificar a mensagem que transfere o direito de transmissão. A maior complexidade e o maior custo resultantes desta característica fazem com que o *hub polling* não seja a técnica preferida para implementação nas redes que operam com *polling* e controle centralizado.

3.3. ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS TÉCNICAS DE POLLING

O *tempo de ciclo* e o *walk time* são dois parâmetros que influenciam o desempenho das técnicas de *polling*, sendo definidos como:

- *Tempo de ciclo* (T_c): intervalo de tempo decorrido entre o recebimento, por uma mesma estação secundária, de duas mensagens de *polling* sucessivas.
- *Walk time* (T_w): tempo requerido para transferir o direito de transmissão de uma estação secundária para outra, que inclui: tempo de propagação no canal, tempo de transmissão da mensagem de *polling*, tempo de transmissão da mensagem de resposta do terminal, tempo de sincronização dos *modems*, etc.

As análises para as técnicas *roll-call polling* e *hub polling* são similares. A diferença é o valor do *walk time*, menor para o *hub polling* [Hammond86] [Schwartz87]. Admite-se as seguintes hipóteses:

1. O processo de chegada dos pacotes em cada estação segue uma distribuição de Poisson, com uma taxa de chegada de λ pacotes por segundo.
2. O *walk time* é constante.
3. Os tempos de propagação entre estações são iguais, e são incluídos no *walk time*.
4. A distribuição estatística do tamanho dos pacotes é a mesma para todas as estações.

O número médio de pacotes armazenados em uma dada estação quando a mesma recebe uma mensagem de *polling* é dado por:

$$E\{N_m\} = \lambda \cdot E\{T_c\} \quad (2.38)$$

O tempo médio gasto para que a estação transmita seus pacotes a cada ciclo de *polling* é

$$E\{T_o\} = E\{N_m\} \cdot \frac{n}{R} \quad (2.39)$$

O acesso ao canal é então transferido para outra estação após o *walk time* (T_w). Assim, o tempo de ciclo (T_c) é:

$$E\{T_c\} = \frac{M \cdot T_w}{1 - \rho} \quad (2.40)$$

onde ρ é o fator de utilização do canal, dado por

$$\rho = \frac{M \lambda n}{R} \quad (2.41)$$

Os pacotes que chegam à estação são armazenados em um fila até o momento da transmissão. O tempo médio entre o instante em que o pacote chega na fila e o instante em que ele tem sua transmissão iniciada, definido como tempo de acesso (T_a), pode ser decomposto em duas componentes: a primeira contabiliza o tempo que o pacote espera na estação enquanto outras estações estão sendo servidas, mesmo que não haja fila, T_1 , e a segunda é o tempo que o pacote espera na fila, a partir do instante em que a estação recebe a autorização para transmissão, T_2 . A análise a seguir considera que estes tempos são independentes.

O tempo médio entre a chegada de um pacote na estação e o início do processo de transmissão é $(T_c - T_o)/2$. Logo, tem-se:

$$E\{T_1\} = \frac{\left(1 - \frac{\lambda \cdot n}{R}\right) \cdot E\{T_c\}}{2} \quad \text{ou}$$

$$E\{T_1\} = \frac{M \cdot T_w \cdot \left(1 - \frac{\rho}{M}\right)}{2(1 - \rho)} \quad (2.42)$$

Para o cálculo de T_2 considera-se um sistema de filas M/G/1 em que os clientes são os pacotes gerados por todas as estações da rede, ou seja, considera-se que as M filas individuais de cada estação estão agrupadas em um único ponto, formando uma única fila, com taxa de chegada igual à taxa total da rede ($M\lambda$).

$$E\{T_2\} = \frac{\rho \cdot E\{n^2\}}{2nR(1 - \rho)} \quad (2.43)$$

O tempo de acesso é:

$$E\{T_a\} = \frac{M \cdot T_w \cdot \left(1 - \frac{\rho}{M}\right)}{2(1 - \rho)} + \frac{\rho \cdot E\{n^2\}}{2nR(1 - \rho)} \quad (2.44)$$

O atraso de transferência de pacote pode ser calculado por:

$$E\{T\} = \frac{n}{R} + t_p + E\{T_a\} \quad (2.45)$$

onde t_p é o atraso de propagação médio entre as estações secundárias e a estação primária, e usualmente é considerado como a metade do tempo de propagação entre a estação primária e a estação secundária na extremidade da rede.

As Figuras 2.17 e 2.18 ilustram o comportamento do atraso de transferência de pacote, normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote, em uma rede onde os pacotes possuem tamanho fixo. O tempo de propagação médio foi considerado igual a $a/2$, onde a é o tempo de propagação, normalizado, entre a estação primária e a estação secundária na extremidade da rede.

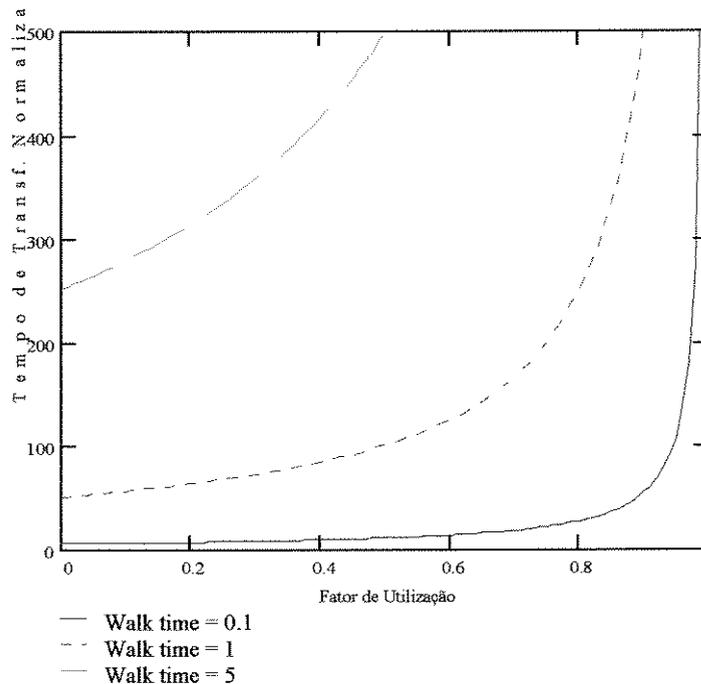


Figura 2.17 - Atraso de transferência de pacote normalizado versus fator de utilização, em uma rede com 100 estações, para os seguintes valores normalizados de *walk time*: 0.1, 1 e 5.

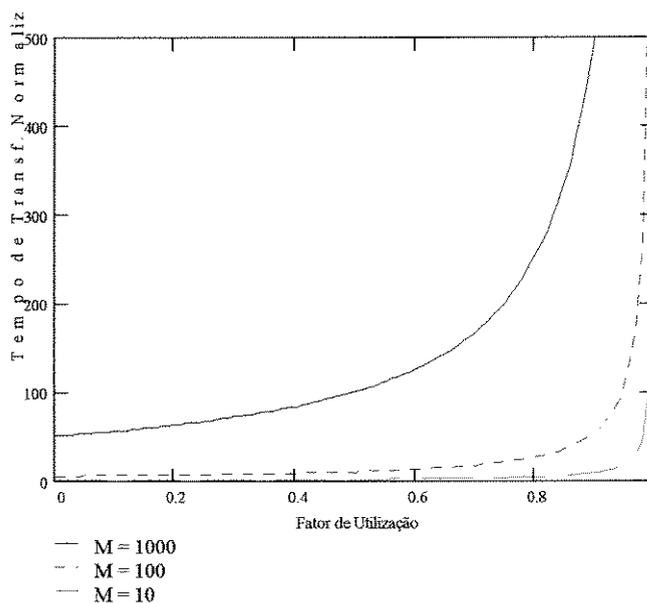


Figura 2.18 - Atraso de transferência de pacote normalizado versus fator de utilização, em uma rede com *walk time* = 0.1, para os seguintes valores de M : 10, 100 e 1000 estações.

O desempenho das redes com *polling* é fortemente dependente do número de estações e do *walk time*, que por sua vez depende do tempo de propagação. Para baixos valores de carga o desempenho é pior do que o encontrado nas técnicas com acesso aleatório. Isto se deve ao tempo perdido entre o instante em que o pacote chega à estação e o instante em que o mesmo tem sua transmissão iniciada, que nestas condições é aproximadamente igual a metade do tempo de ciclo.

A Figura 2.19 compara o atraso de transferência de pacote em uma rede TDMA com o de uma rede utilizando *polling*. Em ambas as redes considerou-se $a = 0.01$ e $M = 100$ estações. Na Figura 2.20 a mesma comparação é feita, considerando-se agora $a = 10$ e $M = 100$. Para a rede com *polling*, o *walk time* normalizado foi considerado igual a $(2a + 10/n)$.

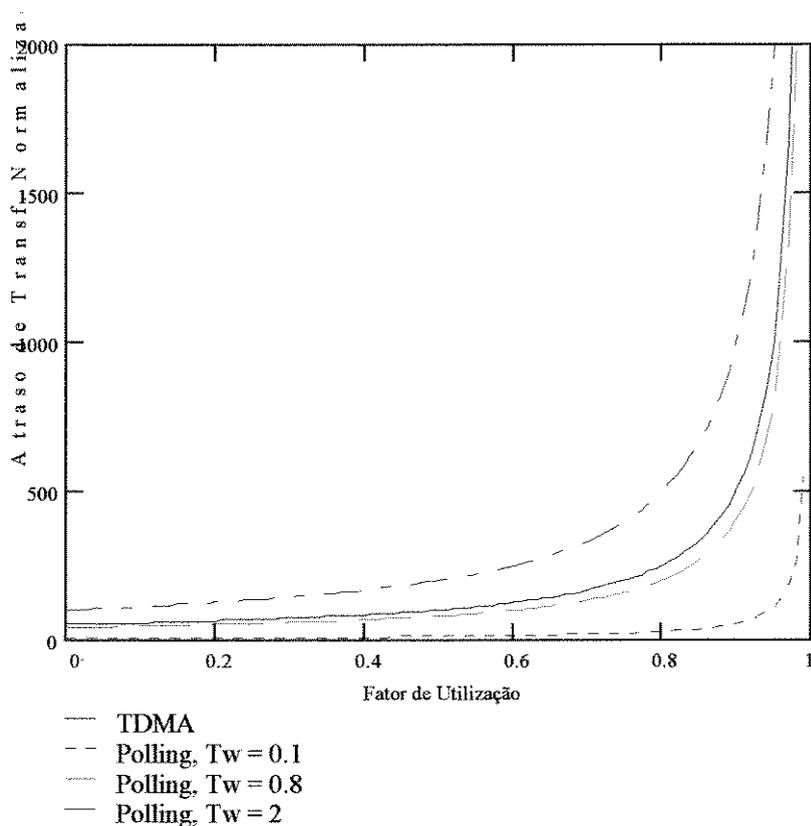


Figura 2.19 - TDMA versus *polling*, atraso de transferência em rede com $a = 0.01$ e $M = 100$ estações.

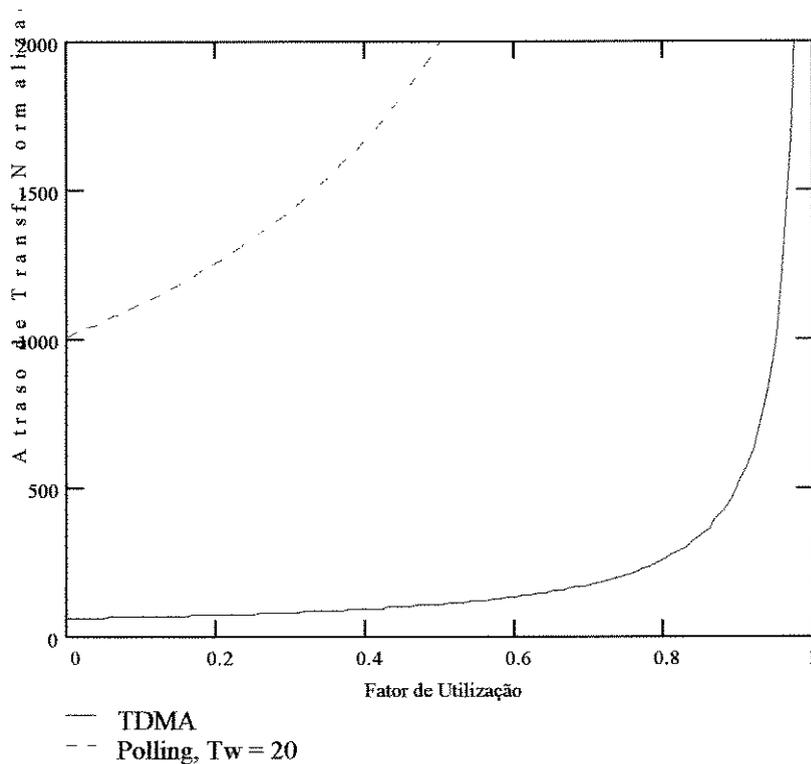


Figura 2.20 - TDMA versus *polling*, atraso de transferência em rede com $a = 10$ e $M = 100$ estações.

Das Figuras 2.19 e 2.20 pode-se concluir:

- Em redes com tempo de propagação baixo, o *polling* tem desempenho inferior ao TDMA quando o tamanho do pacote de dados for muito pequeno. Se o *walk time* normalizado da rede com *polling* for igual a 1, as duas redes tem praticamente o mesmo desempenho.
- Se o tempo de propagação na rede for alto, o TDMA apresenta desempenho bastante superior ao *polling*, pois este tem seu desempenho prejudicado pelo elevado valor do *walk time*.

A existência das mensagens de controle entre as estações primária e secundária caracteriza uma perda de capacidade pelo ponto de vista da transmissão da informação. A máxima vazão na rede é limitada pela expressão (2.46) [Peyravi96]:

$$S \leq \frac{\tau}{T_w + \tau} \quad (2.46)$$

A técnica de *polling* torna-se extremamente ineficiente quando o tráfego consiste de mensagens muito curtas.

Nas técnicas *roll-call polling* e *hub polling* as estações recebem a mensagem de *polling* a cada ciclo, independente de sua atividade. Se a rede possui baixo tráfego, poucas estações ativas, o *overhead* é elevado, resultando em uma má utilização do canal.

4. MÚLTIPLO ACESSO COM ALOCAÇÃO POR DEMANDA E CONTROLE DISTRIBUÍDO

As técnicas de acesso com alocação por demanda e controle distribuído apresentam maior confiabilidade do que as técnicas com controle centralizado, uma vez que o funcionamento da rede não depende de uma estação de controle (primária) central. O controle distribuído proporciona um melhor desempenho quanto ao tempo para transferência de um pacote e quanto a utilização do canal. Também nestes protocolos as estações trocam, explícita ou implicitamente, informações sobre suas necessidades de transmissão. As estações executam, de forma independente, o mesmo algoritmo, e decidem elas mesmas quando podem transmitir suas mensagens, sem a interveniência de uma estação de controle.

Os protocolos de acesso analisados nesta seção são os protocolos de passagem de ficha, que são implementados nas redes *Token Ring* e FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*), com as variantes ficha única, pacote único e múltiplas fichas.

4.1. PROTOCOLO DE PASSAGEM DE FICHA EM REDES EM ANEL

Uma rede em anel, tal como mostrada na Figura 2.21, pode ser caracterizada como uma seqüência de enlaces ponto a ponto entre estações adjacentes. As mensagens circulam no anel usualmente de forma unidirecional, de modo a simplificar a técnica de acesso e evitar decisões de roteamento.

O controle de acesso à rede é feito através de uma mensagem de controle denominada ficha (*token*). A ficha tem um campo de *status* que indica se a mesma está livre ou ocupada. Quando nenhuma estação está transmitindo a ficha circula no anel. Uma estação que tenha dados para transmitir espera a passagem de uma ficha livre, muda seu *status* para ocupada e transmite sua mensagem a seguir. A ficha ocupada é assim incorporada como parte do cabeçalho da mensagem transmitida pela estação. A ficha é normalmente uma mensagem um pouco mais complexa, com campos de prioridade e reserva.

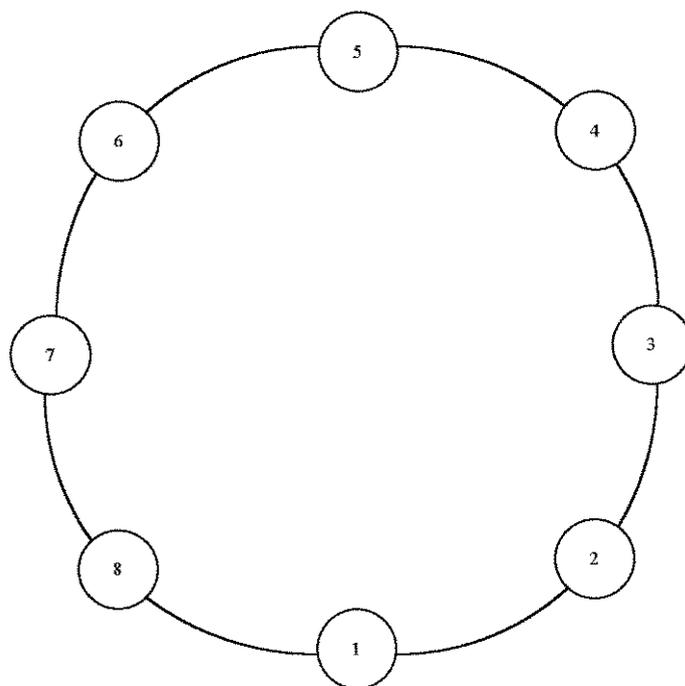


Figura 2.21 - Rede com topologia em anel.

Uma vez adquirida uma ficha livre, a estação ganha o direito de acesso ao anel. Existem dois tipos básicos de operação: serviço exaustivo e serviço não-exaustivo. No serviço exaustivo a estação retém o acesso ao anel até que ela tenha transmitido todos os seus dados. No serviço não-exaustivo a estação só pode transmitir por um determinado período máximo de tempo, denominado tempo de retenção da ficha. Caso este tempo se esgote antes do término dos dados, a estação interrompe temporariamente o processo de transmissão, adquire nova ficha livre quando possível, e retoma então a transmissão. Este procedimento se repete até que todos os dados tenham sido transmitidos. Sob condições de tráfego leve ou médio, os dois tipos de operação são equivalentes. Este trabalho analisa apenas as redes com operação exaustiva.

O pacote transmitido por uma estação chega à estação seguinte no anel após um tempo igual ao tempo de propagação entre as estações. O fluxo de bits recebido por uma estação da rede é retransmitido após um atraso denominado *latência da estação* (δ). A latência da estação é no mínimo um bit, podendo chegar a valores da ordem de 12 bits ou mais, quando campos de controle com outras funções são utilizados na ficha. Se nenhuma estação estiver transmitindo, a ficha dá uma volta completa no anel em um tempo igual à soma dos tempos de propagação em cada enlace mais a latência de todas as estações. Este tempo é denominado de *latência do anel* (χ).

Uma vez inserida uma mensagem no anel, é preciso que se estabeleça um mecanismo de retirada da mesma, ou ela circulará eternamente no anel. A retirada da mensagem pode ser feita pela estação de destino ou pela estação de origem. Esta última opção é a usualmente utilizada, pois oferece algumas vantagens, tais como:

- maior facilidade para operação em modo *broadcast* ou *multicast*;
- maior facilidade para operação em modo espião, onde uma estação monitora o tráfego na rede, para fins de gerência e controle;
- necessidade de menor latência em cada estação;
- possibilidade da estação de destino enviar à estação de origem algum tipo de reconhecimento de carona na própria mensagem recebida.

A estação que ocupou a ficha é então responsável por retirar sua mensagem do anel e restituir a ficha livre. O processo de restituição da ficha pode ser feito de três formas básicas, dando origem às operações denominadas *ficha única*, *múltiplas fichas* e *pacote único*, descritas a seguir:

- **MÚLTIPLAS FICHAS:** a estação gera uma nova ficha livre imediatamente após a transmissão do último bit de sua mensagem, independentemente de ter recebido ou não a ficha ocupada de volta. Se o tempo de transmissão da mensagem for menor do que a latência do anel, pode-se ter mais de uma ficha circulando no anel simultaneamente (mas apenas uma livre).
- **FICHA ÚNICA:** a estação só gera uma nova ficha livre após receber de volta a ficha ocupada associada a sua transmissão. Se o tempo de transmissão da mensagem é maior que a latência do anel, a estação receberá de volta a ficha ocupada antes de terminar de transmitir sua mensagem. Neste caso a estação termina sua transmissão antes de gerar a ficha livre. Verifica-se que as técnicas de múltiplas fichas e de ficha única só diferem quando o tempo de transmissão da mensagem é menor do que a latência do anel.
- **PACOTE ÚNICO:** a estação só gera uma ficha livre após receber de volta todos os bits de sua mensagem. O tempo gasto para recolocar a ficha livre no meio é maior, mas existe a possibilidade da estação avaliar sua própria mensagem, e os possíveis reconhecimentos de carona, antes de restituir a ficha.

O tempo médio de transferência de um pacote para uma rede em anel com passagem de ficha é composto de três parcelas: o tempo médio para transmitir o pacote, o tempo médio de latência do anel e o tempo médio para que a estação adquira a ficha livre (atraso de acesso).

Para análise da rede utiliza-se o modelo mostrado na Figura 2.22, onde as filas em cada estação são atendidas de forma cíclica, representando a passagem da ficha estação por estação. O tempo para passar a ficha livre de uma estação para a próxima no anel, igual ao atraso de propagação entre as estações mais a latência da estação, é o *walk time* da rede em anel, e é considerado constante (T_w) [Bux81][Bux89].

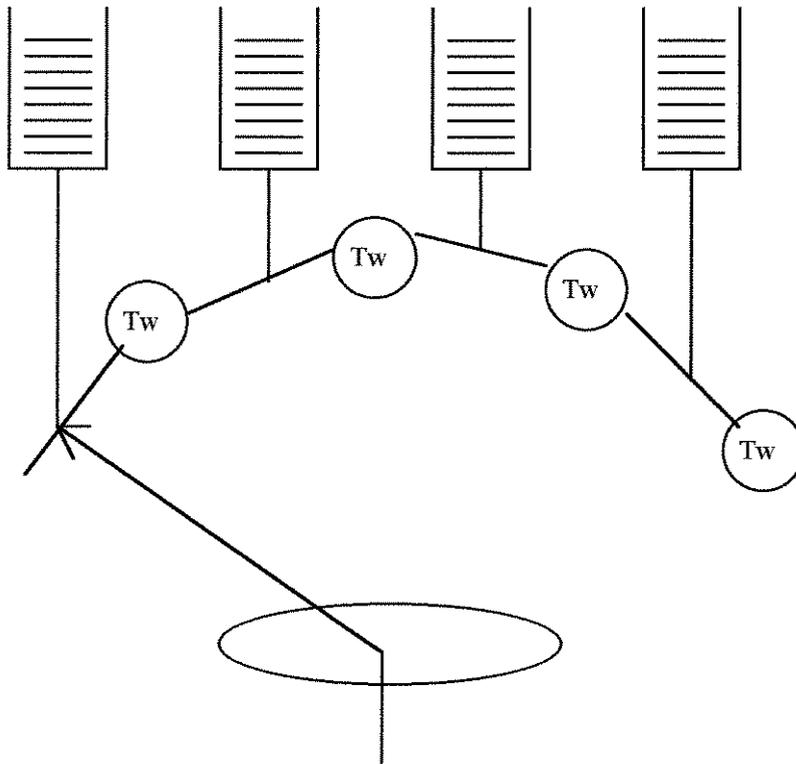


Figura 2.22 - Modelo para análise de rede em anel.

O atraso de transferência de pacote é dado por:

$$E\{T\} = \frac{n}{R} + \frac{\lambda}{2} + E\{T_a\} \quad (2.47)$$

O cálculo de $E\{T_a\}$ pode ser feito adaptando-se a expressão (2.44), desenvolvida para a técnica de *polling*, às características de cada um dos três tipos de implementação. O *walk time* para a rede em anel é dado por:

$$T_w = \frac{t_p}{M} + \delta = \frac{\lambda}{M} \quad (2.48)$$

4.1.1. OPERAÇÃO COM MÚLTIPLAS FICHAS

Neste tipo de operação uma ficha livre é gerada tão logo o último bit da mensagem deixe a estação transmissora. O tempo de acesso é dado diretamente pela expressão (2.44), considerando-se o valor de *walk time* dado pela expressão (2.48). Assim, tem-se:

$$E\{T\} = \frac{n}{R} + \frac{\chi}{2} + \frac{\chi \cdot \left(1 - \frac{\rho}{M}\right)}{2 \cdot (1 - \rho)} + \frac{\rho \cdot E\{n^2\}}{2nR \cdot (1 - \rho)} \quad (2.49)$$

A máxima vazão é $\rho_{\max} = 1$.

4.1.2. OPERAÇÃO COM PACOTE ÚNICO

Nesta técnica uma nova ficha só é gerada após a estação transmissora receber toda a sua mensagem de volta. O tempo de serviço de um pacote inclui, além do tempo de transmissão, a latência total do anel.

$$E\{T_s\} = \frac{n}{R} + \chi \quad (2.50)$$

$$E\{T_s^2\} = \frac{E\{n^2\}}{R^2} + 2 \cdot \chi \cdot \frac{n}{R} + \chi^2 \quad (2.51)$$

O tempo de acesso pode ser calculado pela expressão (2.44), substituindo-se n/R por (2.50), $E\{n^2\}/R^2$ por (2.51), e utilizando-se

$$\rho = M \cdot \lambda \cdot E\{T_s\} \quad (2.52)$$

O atraso médio de transferência de pacote é:

$$E\{T\} = \frac{n}{R} + \frac{\chi}{2} + \frac{\chi \cdot \left[1 - \frac{\rho}{M}\right]}{2[1 - \rho]} + \frac{\rho \cdot E\{T_s^2\}}{2 \cdot E\{T_s\} \cdot [1 - \rho]} \quad (2.53)$$

O valor de ρ calculado pela expressão (2.52) não representa a vazão na rede, que pode ser calculada por

$$S = M \cdot \lambda \cdot \frac{n}{R} \quad (2.54)$$

A expressão (2.52) pode ser reescrita em função da vazão:

$$\rho = S(1 + y) \quad (2.55)$$

onde y é a latência do anel normalizada em relação ao tempo de transmissão do pacote. Ou seja,

$$y = \frac{\chi}{n/R} \quad (2.56)$$

Das expressões (2.53) e (2.55) tem-se que a máxima vazão na rede é dada por:

$$S_{max} = \frac{1}{1 + y} \quad (2.57)$$

4.1.3. OPERAÇÃO COM FICHA ÚNICA

Uma ficha livre é gerada tão logo a estação receba de volta sua ficha ocupada. Se o tempo de transmissão do pacote é maior que a latência do anel, a ficha ocupada retorna antes que a estação termine de transmitir sua mensagem. Neste caso, a estação termina primeiro sua transmissão para só então restituir a ficha livre, ficando idêntico ao sistema com múltiplas fichas, com o tempo de serviço idêntico ao tempo de transmissão da mensagem.

Se o tempo de transmissão do pacote é menor do que a latência do anel, a estação termina de transmitir sua mensagem e aguarda o retorno da ficha ocupada para então restituir a ficha livre, neste caso o tempo de serviço passa a ser igual à latência do anel.

Percebe-se então que a forma de calcular o tempo de serviço depende do tamanho do pacote transmitido naquele instante. Assim, para derivar uma expressão que permita calcular o atraso médio de transferência de pacote faz-se necessário estabelecer primeiro qual a distribuição de probabilidade do tamanho do pacote.

Para pacotes com comprimento fixo, se n/R é maior do que a latência, utiliza-se as expressões para sistemas com múltiplas fichas. Se n/R é menor do que a latência, utiliza-se a expressão (2.53), com:

$$E\{T_s\} = \chi \quad E\{T_s^2\} = \chi^2 \quad \rho = M \cdot \lambda \cdot \chi = S \cdot y$$

A máxima vazão na rede é:

$$S_{max} = \frac{1}{y} \quad (2.58)$$

A Figura 2.23 compara o desempenho da técnica de múltiplas fichas com a técnica de ficha única, em uma rede com 100 estações.

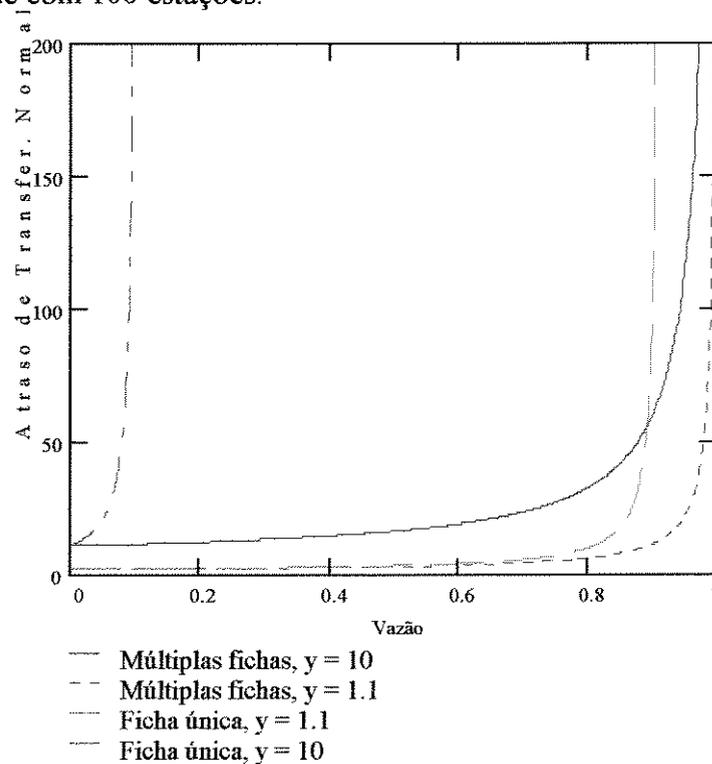


Figura 2.23 - Vazão versus atraso de transferência para ficha única e múltiplas fichas.

Da figura observa-se:

- A vazão máxima para ficha única varia significativamente com a latência da rede.
- Para valores de latência normalizada próximos de 1 e baixos valores de vazão, as técnicas de ficha única e múltiplas fichas possuem atraso de transferência praticamente iguais.
- A máxima vazão da técnica de múltiplas fichas não é afetada pela latência do anel, mas o atraso de transferência cresce com este parâmetro.

A Figura 2.24 compara o atraso de transferência em uma rede CSMA-CD, com $a = 0.05$, com o de uma rede com passagem de ficha, onde $y = 0.075$ e $M = 100$ estações. Observa-se o desempenho semelhante para pequenos valores de vazão, com ligeira vantagem para o CSMA-CD para valores de vazão muito pequenos, e a vantagem do método de passagem de ficha quando a vazão aumenta.

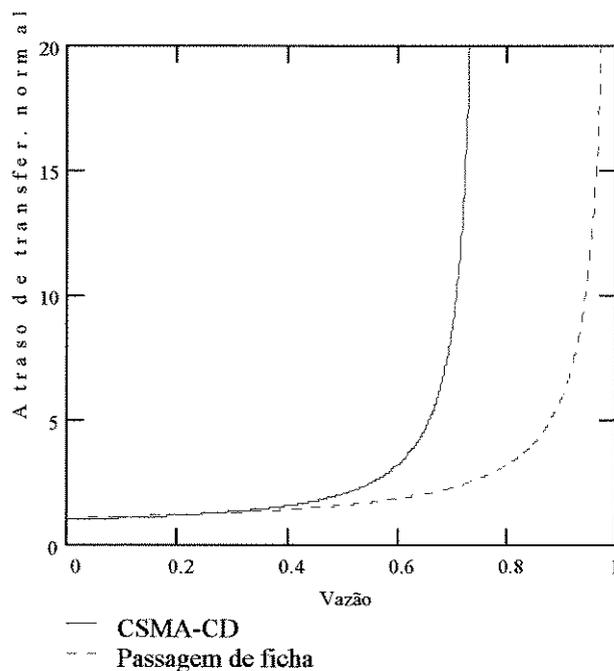


Figura 2.24 - Vazão versus atraso de transferência para os protocolos CSMA-CD e passagem de ficha.

5. PROTOCOLOS HÍBRIDOS

Nestes protocolos busca-se incorporar características das classes anteriores em um único protocolo. Uma importante subclasse é a dos protocolos com reserva, que podem ser classificados em protocolos com reserva explícita e protocolos com reserva implícita.

PROTOCOLOS COM RESERVA EXPLÍCITA: o tempo é dividido em janelas de duas categorias: janelas para reserva e janelas para transmissão. As janelas para reserva são curtas e são usadas para solicitação de reserva de janelas para transmissão, que são longas. As janelas para reserva podem ser compartilhadas pelas estações usando um protocolo com alocação fixa (como TDMA) ou um protocolo aleatório (como *Slotted-Aloha*). O uso de protocolo com alocação fixa evita a colisão entre mensagens de reserva mas, por razões de desempenho, só é adequado se o número de estações na rede não for grande. Por outro lado, o uso de protocolos de acesso aleatório nas janelas para reserva pode apresentar problemas de instabilidade sob tráfego elevado.

PROTOCOLOS COM RESERVA IMPLÍCITA: o tempo é dividido em janelas que são compartilhadas usualmente através de um protocolo de acesso aleatório. A transmissão com sucesso em uma dada janela de tempo garante à estação transmissora o direito exclusivo de transmissão na mesma janela no quadro seguinte. Estes protocolos tendem a se comportar como protocolos com acesso aleatório sob condições de pouco tráfego e como protocolos de alocação fixa sob condições de tráfego intenso.

5.1 RESERVATION ALOHA

Este protocolo é do tipo reserva implícita. O tempo é dividido em quadros, com duração maior que o tempo de propagação na rede, que são divididos em janelas de tempo. As janelas de tempo são classificadas em janelas reservadas e janelas disponíveis. Uma janela que não foi utilizada com sucesso no quadro anterior é classificada como disponível no quadro corrente. As estações disputam as janelas disponíveis utilizando a técnica *Slotted-Aloha*. Quando uma estação consegue uma transmissão com sucesso em uma janela de um quadro, as janelas de mesma posição dos quadros seguintes permanecem reservadas para ela enquanto a estação tiver pacotes para transmitir, caracterizando um protocolo do tipo TDMA para a estação detentora da reserva.

Duas variantes do mesmo protocolo podem ser estabelecidas: na primeira um *bit* de *flag* é utilizado para indicar que o pacote transmitido em uma janela reservada é o último da estação e que, portanto, tal janela estará disponível para acesso aleatório no quadro seguinte; na outra este *bit* de *flag* não é utilizado, e uma janela é desperdiçada toda vez que uma estação finaliza sua transmissão.

A máxima vazão no canal pode ser expressa em termos da máxima vazão do protocolo *Slotted-Aloha* (S_{SA}), e é dada pela expressão (2.59), se o *flag* de último pacote é utilizado, e pela expressão (2.60) se o *flag* não é utilizado [Lam79].

$$S_{max} = \frac{S_{SA}}{S_{SA} + \frac{1 - S_{SA}}{L}} \quad (2.59)$$

$$S_{max} = \frac{S_{SA}}{S_{SA} + \frac{1}{L}} \quad (2.60)$$

onde L é o número médio de pacotes que uma estação transmite quando adquire a reserva de uma janela de tempo. A Figura 2.25 mostra a variação da vazão máxima com L .

O valor de L pode variar entre 1 e infinito, estabelecendo os seguintes limites para S_{max} :

$$\frac{1}{1+e} \leq S_{max} \leq 1 \quad \text{se o } flag \text{ não é utilizado} \quad (2.61)$$

$$\frac{1}{e} \leq S_{max} \leq 1 \quad \text{se o } flag \text{ é utilizado} \quad (2.62)$$

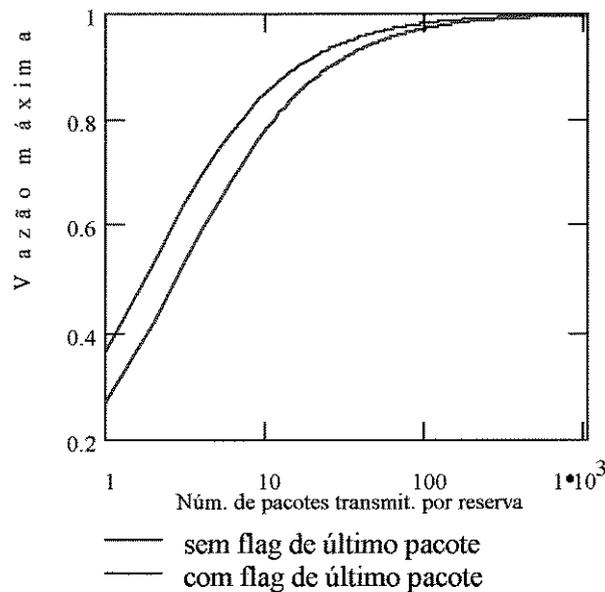


Figura 2.25 – Vazão máxima para a técnica R-Aloha

Um dos problemas deste protocolo é que uma estação pode capturar um grande número (ou até mesmo todas) de janelas por tempo indefinido, causando problema de equidade no acesso e de atraso de acesso elevado para as demais estações da rede.

5.2. TDMA COM RESERVA (R-TDMA)

As janelas de dados são precedidas por M janelas de reserva, sendo uma janela de reserva para cada estação da rede. O período de reserva em cada quadro tem uma duração total Md_r , sendo d_r a duração de uma janela de reserva, normalizada em relação ao tempo de transmissão de um pacote. A duração mínima de um quadro é igual ao tempo de propagação na rede, de modo que as janelas de reserva no início de um quadro são utilizadas para reservar janelas de transmissão no quadro seguinte. O número de janelas de dados em um quadro depende do número de janelas de reserva que foram utilizadas no quadro anterior.

A Figura 2.26 ilustra os quadros em um sistema R-TDMA com 5 estações. O intervalo de reserva é composto de 5 janelas de reserva (curtas) e o intervalo de transmissão é composto de até 5 janelas de transmissão, dependendo do tráfego na rede, admitindo-se que cada estação transmite um único pacote por reserva. O instante T_1 representa a chegada de um pacote em uma estação. A reserva para transmissão deste pacote será efetuada no instante T_2 , e será percebida pelas demais estações após o tempo de propagação na rede, no instante T_3 . Portanto, a reserva realizada em um quadro garante a transmissão no quadro seguinte, no instante T_4 .

O uso de TDMA tanto nas janelas de reserva quanto nas janelas de transmissão elimina a possibilidade de colisão. A vazão na rede é função do número de estações com pacotes para transmitir (M_a) e do número médio de pacotes de dados transmitidos por reserva efetuada (L), e pode ser calculada por:

$$S = \frac{M_a \cdot L}{M_a \cdot L + Md_r} \quad (2.63)$$

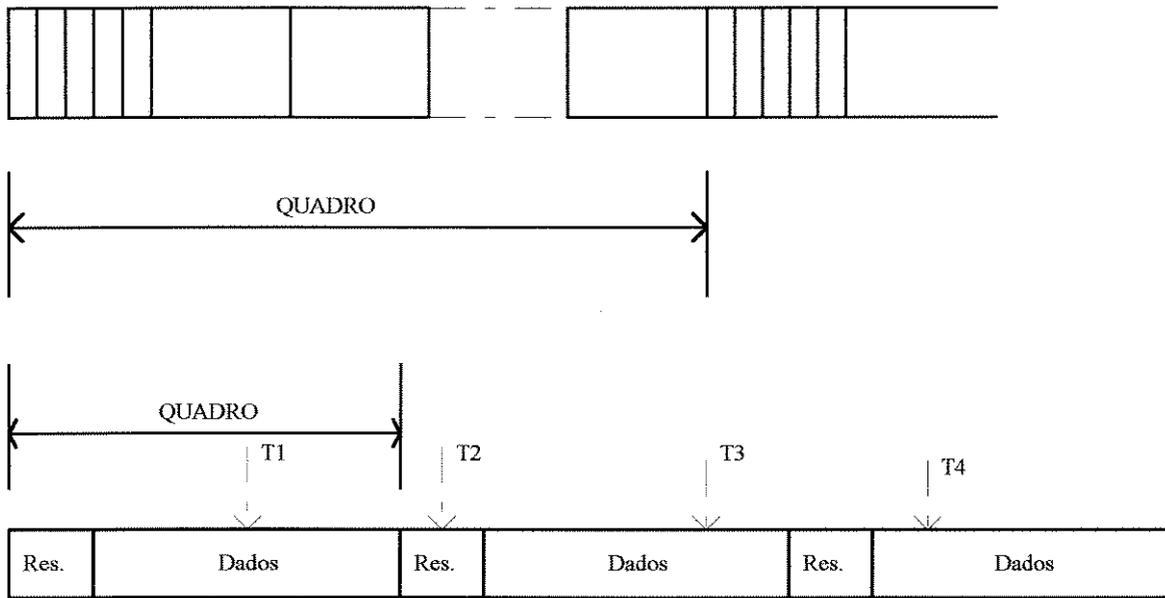


Figura 2.26 - Estrutura do quadro na técnica R-TDMA.

A condição de máxima vazão ocorre quando todas as estações desejam transmitir ($M_a = M$). Admitindo-se que a cada reserva tem-se associado a transmissão de um único pacote, a máxima vazão é:

$$S_{max} = \frac{1}{1 + d_r} \quad (2.64)$$

O R-TDMA apresenta um atraso médio de transferência de pacote menor do que o TDMA em condição de baixo tráfego. Se o número de estações ativas aumenta, o desempenho do R-TDMA é pior do que o TDMA.

5.3. RESERVATION ALOHA II (R-ALOHA)

O R-Aloha é uma técnica de acesso utilizada em sistemas onde as estações podem escutar todas as transmissões que ocorrem na rede, inclusive as suas próprias. Nesta técnica um quadro é formado por $Q + 1$ janelas, sendo Q janelas para transmissão dos dados e 1 janela para reserva. A janela para reserva é subdividida em V pequenas sub-janelas. Uma estação

que deseje transmitir deve fazer a reserva de uma janela de transmissão utilizando uma sub-janela da janela de reserva. A técnica de acesso utilizada na janela de reserva é a *Slotted-Aloha*, podendo haver colisão. Nas janelas de transmissão não há colisão, uma vez que a estação só transmite na janela a ela alocada.

O sistema pode ser visto como uma fila distribuída, toda estação possui um contador J, que mantém o número de pacotes na fila. Uma estação que deseje transmitir obtém a confirmação de sua reserva escutando sua própria mensagem de requisição de janela de transmissão, o contador J indicará então a posição da janela (ou das janelas) que será utilizada para transmissão. A Figura 2.27 mostra uma situação em que uma estação faz uma primeira tentativa de reserva sem sucesso, devido a uma colisão; uma segunda tentativa com sucesso permite que a estação transmita três pacotes na posição indicada por seu contador J.

No momento em que não há nenhum pacote a ser transmitido na rede (não há nenhum pacote na fila), o sistema entra em um modo de operação denominado modo sem reserva, onde todas as $Q+1$ janelas são divididas em sub-janelas para reserva. A ocorrência de um pedido de reserva causará a mudança do sistema para o modo reservado, onde apenas a última janela do quadro de $Q+1$ janelas é dividida em sub-janelas. Na Figura 2.27, quando a estação fez a primeira tentativa de reserva, o sistema estava no modo sem reserva.

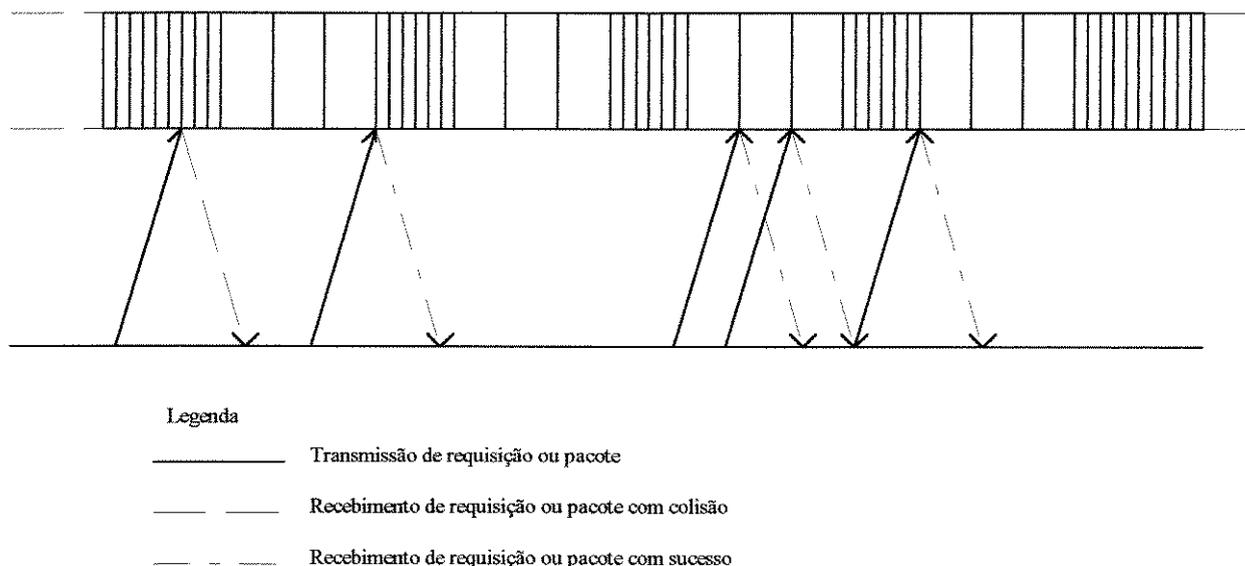


Figura 2.27 - Estrutura do quadro R-Aloha com $Q = 3$ e $V = 6$.

Se L é o número médio de pacotes de dados transmitidos por requisição de reserva, a relação entre o número de bits de dados e o número de bits de reserva no quadro é VL . Assumindo-se que o canal de reserva é usado somente para pacotes de reserva e que a máxima vazão do canal de reserva é S_{SA} , o percentual da capacidade do canal necessário para transmitir o tráfego de reserva é $\frac{1}{1 + S_{SA} \cdot VL}$.

A máxima vazão do canal pode ser calculada por [Lam79]:

$$S_{max} = 1 - \frac{1}{1 + S_{sd} \cdot VL} = \frac{1}{1 + \frac{1}{S_{sd} \cdot VL}} \quad (2.65)$$

A Figura 2.28 mostra o comportamento da vazão máxima em função do número médio de pacotes transmitidos por reserva e do número de sub-janelas na janela de reserva.

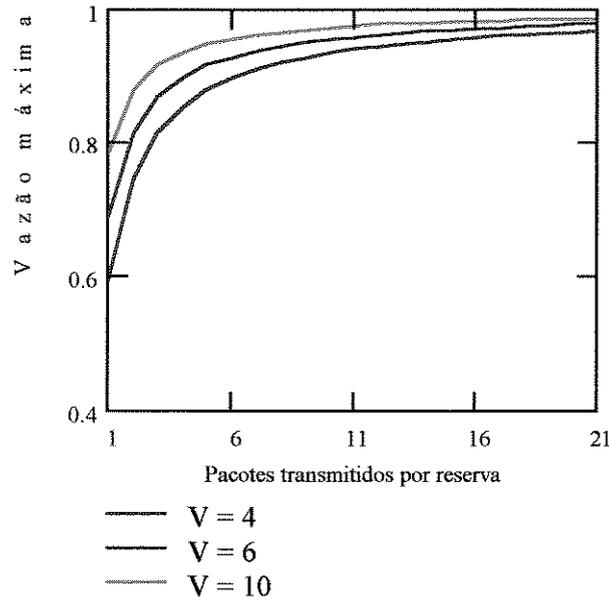


Figura 2.28 – Vazão máxima versus número médio de pacotes transmitidos por reserva.

A seguir deriva-se, seguindo [Saadawi94], uma expressão que estabelece um limite para o número de janelas de dados em um quadro. Para tal, defini-se Z como a taxa do canal em janelas por segundo e admiti-se que se tenha M_a estações ativas na rede, com cada uma transmitindo, em média, L pacotes por requisição (ou seja, uma requisição gera a ocupação de L janelas de dados). Admitindo-se que cada estação gera λ requisições por segundo, tem-se associada a cada usuário uma taxa de chegada de $L\lambda$ pacotes por segundo, resultando em um tráfego de dados total de $M_a L \lambda$ pacotes de dados por segundo e um tráfego de requisição total de $M_a \lambda$ pacotes de requisição por segundo.

Quando o sistema está no modo não reservado todas as janelas são de reserva, e a taxa disponível para pacotes de reserva é ZV janelas de reserva por segundo, resultando em um fator de utilização das janelas de reserva igual a:

$$S_1 = \frac{M_a \cdot \lambda}{ZV} \quad (2.66)$$

Quando o canal está no estado reservado, somente uma janela a cada $Q+1$ janelas é dedicada a pacotes de reserva. A taxa de janelas de reserva é $ZV/(1+Q)$ janelas por segundo, resultando em um fator de utilização das janelas de reserva dado por:

$$S_2 = \frac{M_a \cdot \lambda}{\frac{ZV}{1+Q}} \quad (2.67)$$

Como a cada $(1+Q)$ janelas uma é utilizada para reserva e Q são utilizadas para transmissão de pacotes de dados, a capacidade efetiva do canal é $ZQ/(1+Q)$ janelas por segundo, resultando em um fator de utilização do canal de dados dado por:

$$S_3 = \frac{M_a \cdot L\lambda}{Z(Q/(1+Q))} \quad (2.68)$$

As equações (2.66) a (2.68) podem ser utilizadas para se obter um limite superior para o valor de Q . Como as janelas de reserva são acessadas segundo o protocolo *Slotted-Aloha*, S_1 e S_2 devem ser inferiores a $1/e = 0.368$. Por outro lado, tem-se $S_3 < 1$. Das equações (2.67) e (2.68) tem-se

$$S_2 = \frac{S_3 Q}{VL} < \frac{1}{e}$$

e

$$Q < \frac{LV}{e} \quad (2.69)$$

Considerando-se, por exemplo, os blocos uniformemente distribuídos com comprimento variando de 1 a 8 pacotes e o número de sub-janelas em uma janela de reserva igual a 6, tem-se o máximo número de janelas para transmissão de pacotes em um quadro igual a 9, e a máxima vazão igual a 0.908.

O atraso médio de transferência de pacote do *R-Aloha* é composto de quatro componentes: o atraso médio de acesso, devido ao processo de reserva, $E\{T_a\}$, o tempo médio de enfileiramento dos pacotes na estação, $E\{W\}$, o tempo médio de transmissão do pacote, τ , e o tempo de propagação, t_p .

O tempo médio de enfileiramento pode ser calculado utilizando-se a fila do tipo $M/G/1$ como modelo.

O tempo médio de permanência de um pacote na estação, que inclui o tempo de enfileiramento e o tempo de transmissão do pacote, normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote é dado por [Schwartz77]:

$$E\{T_q\} = \frac{L(Q+1)}{QZ} + \frac{E\{L^2\} \cdot S_3 \cdot (Q+1)}{2LQZ(1-S_3)} \quad (2.70)$$

onde $E\{L^2\}$ é o segundo momento da variável número de pacotes transmitidos por reserva.

O atraso de acesso depende se, no momento da reserva, o sistema está operando no modo reservado ou no modo sem reserva.

No modo sem reserva o sistema é semelhante ao *Slotted-Aloha*. Considerando-se que as estações são capazes de receber suas próprias transmissões, o atraso médio de acesso normalizado em relação ao tempo de transmissão do pacote quando o sistema está no modo sem reserva - $E\{D_{SN}\}$ - pode ser calculado diretamente da expressão (2.31):

$$E\{D_{SN}\} = a + \frac{1.5}{V} + (e^{G_1} - 1) \cdot \left(a + \frac{0.5}{V} + \frac{K+1}{2V} \right) \quad (2.71)$$

onde G_1 é a carga total no sistema quando o mesmo está no modo sem reserva.

O atraso médio de acesso quando o sistema está operando no modo reservado pode ser derivado da expressão válida para o sistema *Slotted-Aloha*, contabilizando-se o atraso inicial adicional devido ao fato das sub-janelas de reserva só estarem disponíveis ao fim do quadro corrente. Para o caso em que $a > (Q+1)$ e $K \leq V$, o valor do atraso médio de acesso normalizado em relação ao tempo de transmissão do pacote quando a estação opera no modo reservado, denotado por $E\{D_{RN}\}$ é dado por [Schwartz77]:

$$E\{D_{RN}\} = a + \frac{Q}{2} + \frac{1.5}{V} + (e^{G_2} - 1) \cdot \left(a + \frac{Q}{2} + \frac{K+1}{2V} \right) \quad (2.72)$$

O tempo médio de acesso é calculado por:

$$E\{T_a\} = E\{D_{SN}\} \cdot (1 - S_3) + E\{D_{RN}\} \cdot S_3 \quad (2.73)$$

O tempo médio de transferência de um pacote, normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote, é dado por:

$$E\{T_N\} = E\{T_a\} + E\{T_q\} + a \quad (2.74)$$

Comparando-se com o resultado válido para a técnica *Slotted-Aloha* conclui-se que o *R-Aloha* apresenta um menor atraso de transferência, a não ser para valores de vazão pequenos, onde o *Slotted-Aloha* tem melhor desempenho.

A Figura 2.29 compara o desempenho da técnica *Slotted-Aloha* com a *R-Aloha*, em um sistema com as seguintes características:

- 10 estações ativas;
- taxa de transmissão de 50 kbps;
- cada estação transmite um único pacote de 1350 bits por reserva;
- tempo de propagação normalizado igual ao tempo de transmissão de 10 pacotes;
- seis sub-janelas em cada janela de reserva ($V = 6$);
- duas janelas por quadro, uma de reserva e uma para transmissão ($M = 2$);
- $K = 6$.

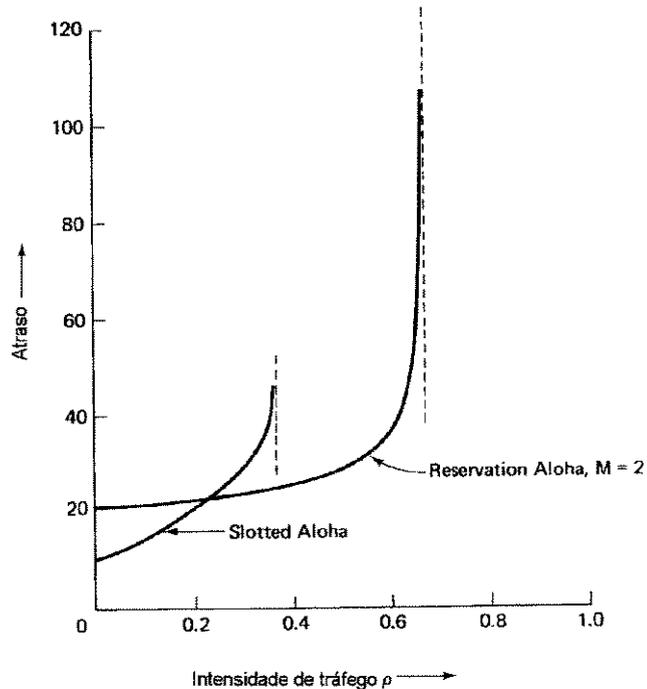


Figura 2.29 – Atraso de transferência de pacote versus intensidade de tráfego [Schwartz77]

A intensidade de tráfego, ρ , representa a utilização do canal, e é calculada por:

$$\rho = \frac{M_a L \lambda}{Z} \quad (2.75)$$

6. CONCLUSÃO

Os protocolos de múltiplo acesso foram classificados em cinco categorias: protocolos com alocação fixa, protocolos de acesso aleatório, protocolos com alocação por demanda e controle centralizado, protocolos com alocação por demanda e controle distribuído, e protocolos híbridos. Em cada categoria foi analisado o desempenho dos protocolos básicos, indicando suas limitações e potencialidades. Com base nesta análise mostrou-se que:

- Os protocolos com alocação fixa e protocolos com alocação por demanda e controle centralizado não são adequados em redes com grande número de estações ou em redes com tráfego em rajadas.
- O protocolo TDMA tem atraso de transferência de pacote inferior aos dos protocolos FDMA e CDMA, e tem vazão máxima superior à do protocolo CDMA.
- Os protocolos aleatórios são adequados em redes com tráfego em rajadas e com baixa vazão.
- O protocolo *Slotted-Aloha* tem atraso de transferência de pacote inferior ao do *Aloha*, a não ser para valores de vazão pequenos.
- O desempenho das técnicas CSMA e CSMA-CD é dependente do tempo de propagação na rede, tornando inadequada a utilização destes protocolos em redes de alta velocidade.
- Em redes onde o *walk time* normalizado é maior do que um, o protocolo de *Polling* tem atraso de transferência de pacote superior ao do protocolo TDMA.
- O desempenho do protocolo de passagem de ficha é superior ao do protocolo CSMA-CD, a não ser para valores de vazão pequenos.
- O protocolo de passagem de ficha com múltiplas fichas pode ser utilizado, com desempenho satisfatório, em redes de alta velocidade.
- Os protocolos híbridos possuem vazão máxima entre os protocolos aleatórios e os protocolos com alocação fixa.
- Os protocolos com reserva apresentam atraso de transferência de pacote inferior aos protocolos aleatórios, para valores de vazão acima de um limiar, e inferior aos protocolos com alocação fixa, para valores de vazão abaixo de um limiar.
- Os protocolos híbridos são adequados em redes com perfil de tráfego variável, incluindo-se redes com tráfego em rajadas e tráfego misto.

CAPÍTULO III - COMUNICAÇÃO MÓVEL TERRESTRE E REDES DE ACESSO SEM FIO

A telefonia móvel celular cresceu exponencialmente desde o surgimento do sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), em 1979. A evolução deu origem aos sistemas de 2ª geração, digitais, com maior capacidade e qualidade que o AMPS, mas ainda orientados a transmissão de voz. A demanda por novos serviços, como transmissão de dados, resultou na necessidade de uma 3ª geração de sistemas.

A disseminação da telefonia celular deu origem aos sistemas WLL (*Wireless Local Loop*), que surge como opção à rede metálica para implementação da rede de telefonia fixa. Os sistemas WLL tem ganho importância significativa, particularmente em países em desenvolvimento, onde a demanda reprimida por serviços de telefonia é alta.

Neste capítulo analisa-se o uso das técnicas de múltiplo acesso nos sistemas de comunicações móveis terrestres e sistemas WLL. Em cada caso analisa-se o desempenho das duas principais técnicas de múltiplo acesso utilizadas nestes sistemas, o TDMA e o CDMA. O capítulo é finalizado com a análise do protocolo de acesso PRMA (*Packet Reservation Multiple Access*), adequado a próxima geração dos sistemas móveis e WLL.

1. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

Os sistemas de comunicações móveis eram centralizados, com uma estação rádio-base responsável por atender todos os usuários de uma dada região.

Algumas características dos sistemas centralizados são:

- Grandes áreas de cobertura (dezenas de Km de raio);
- Uso de transmissores de alta potência;
- Unidades móveis grandes e caras;
- Expansão apenas através de alocação de novos canais;
- Planejamento simples.

Para contornar alguns dos problemas apresentados pelo sistema centralizado surgiu o sistema celular, onde a região a ser coberta é dividida em diversas células, cada uma tendo uma estação rádio-base, conforme ilustra a Figura 3.1.

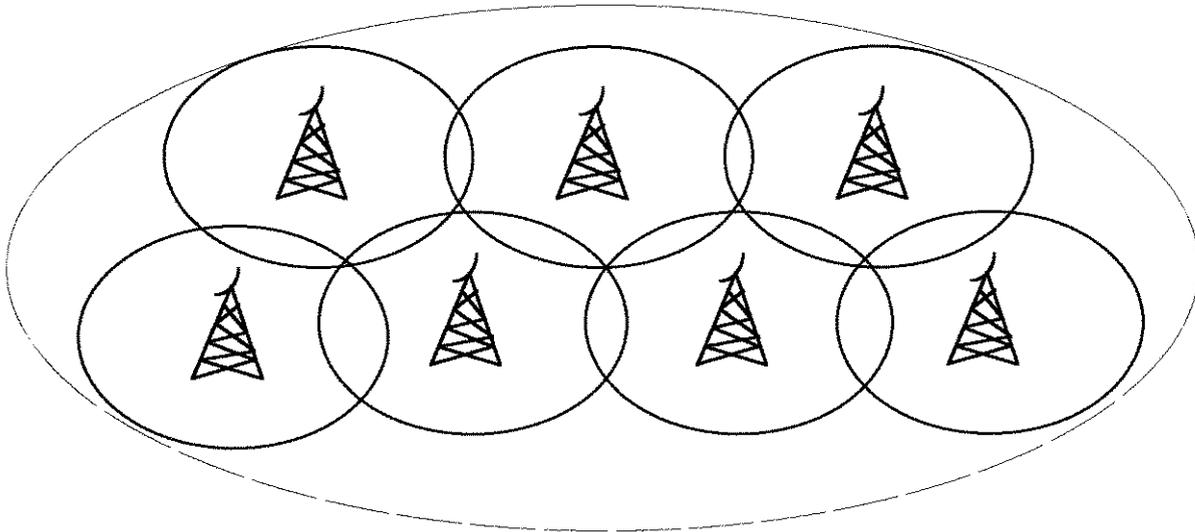


Figura 3.1 - Atendimento de uma região através de células.

Algumas características do sistema celular são:

- Cada estação rádio-base tem uma pequena área de cobertura (2 a 15 Km de raio);
- Menores níveis de potência e unidades móveis menores e de menor custo, quando comparado aos sistemas centralizados;
- Possibilidade de se utilizar a mesma frequência em células diferentes (reuso de frequências), resultando em uma melhor utilização do espectro;
- Durante uma conversação um usuário pode sair da área de cobertura de uma rádio-base e entrar na área de outra, acarretando a alteração da estação rádio-base que o atende. Este procedimento, denominado *handoff*, é bastante comum em sistemas celulares;
- Planejamento complexo;
- Expansão modular e adaptável ao tráfego, podendo ser feita pela subdivisão de células.

1.1. REUSO DE FREQUÊNCIAS

Como o número de canais é limitado, o sistema celular utiliza o reuso de frequências, onde os canais são divididos em K grupos que são reutilizados a intervalos de distância regulares, sendo K denominado fator de reuso. Um *cluster* de células é definido como um conjunto de K células onde se utilizam os K grupos de canais diferentes. As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram sistemas celulares com diferentes fatores de reuso, destacando o *cluster* de células.

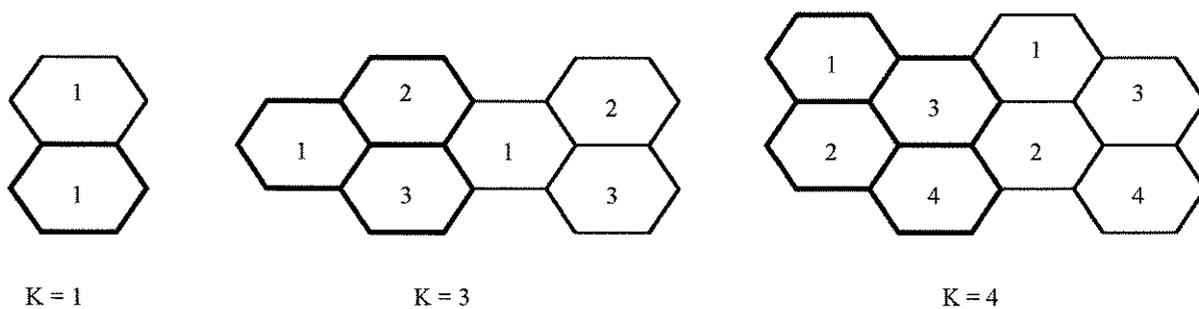


Figura 3.2 - Sistemas com fator de reuso K = 1, 3 e 4.

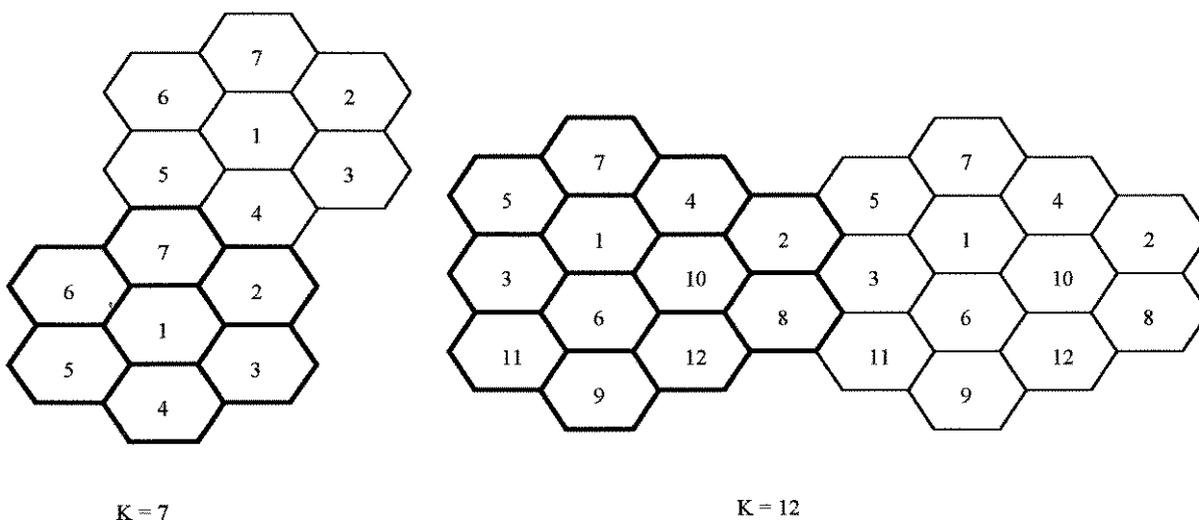


Figura 3.3 - Sistemas com fator de reuso K = 7 e K = 12.

O reuso de frequência resulta em interferência co-canal no sistema. O nível do sinal interferente é função da distância entre a estação receptora e a estação interferente, que por sua vez é função do fator de reuso. A relação entre o nível de sinal desejado e o nível de sinal interferente, considerando 6 estações interferentes, pode ser calculado por [Garg96]:

$$\frac{C}{I} = 10 \log \left[\frac{(\sqrt{3K})^\gamma}{6} \right] \quad (3.1)$$

onde γ é um parâmetro associado às perdas de propagação no percurso entre as estações, com valor típico de 4 para sistemas de telefonia móvel.

Quanto menor o valor de K, maior será a capacidade do sistema e maior será o nível de interferência do mesmo. Assim, a escolha de K é um compromisso entre qualidade e capacidade. Em um sistema digital, tendo-se especificado a mínima relação E_b/N_o admissível, pode-se calcular o mínimo valor de K como [Garg96b]:

$$K = \frac{1}{3} \left[6 \left(\frac{E_b}{N_o} \right) \right]^{\frac{2}{\gamma}} \quad (3.2)$$

1.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROTOCOLO DE ACESSO

As técnicas de múltiplo acesso comumente utilizadas em sistemas de comunicações móveis celulares são:

- FDMA, usada no sistema AMPS.
- TDMA (na verdade TDMA/FDMA) adotada nos sistemas IS54, IS136, GSM (*Global System for Mobile Communications*), PDC (*Personal Digital Cellular*), DECT (*Digital European Cordless Telecommunications*), e PHS (*Personal Handphone System*)
- CDMA (na verdade CDMA/FDMA) utilizada no sistema IS95.

Os diversos padrões existentes divergem no protocolo de acesso e em outras características (tais como: técnica de digitalização de voz, uso de códigos para correção automática de erro, uso de algoritmos de detecção de sinal de voz) que interferem diretamente no desempenho do sistema.

O parâmetro de desempenho utilizado para comparação dos protocolos de acesso é a capacidade do sistema quanto ao número máximo de estações móveis por célula (M).

Considera-se um sistema com as seguintes características básicas:

- A largura de faixa total disponível é W Hz;
- A taxa de transmissão de cada fonte de informação (sem codificação de canal) é R bps;
- A técnica de modulação digital utilizada possui eficiência de largura de faixa de α bps/Hz;
- Não se utiliza codificação de canal.

1.2.1. FDMA x TDMA

Para o sistema FDMA, desconsiderando-se a faixa de guarda necessária entre um canal e outro, em um sistema com célula única, a capacidade do sistema é dada pela relação entre a largura de faixa disponível e a largura de faixa necessária para a transmissão de cada usuário, resultando em:

$$M = \frac{W\alpha}{R} \quad (3.3)$$

Se o sistema é composto de múltiplas células, torna-se necessário dividir os M canais em K subgrupos, onde K é o fator de reuso de frequências. O número de canais por célula torna-se:

$$M = \frac{W\alpha}{R} \cdot \frac{1}{K} \quad (3.4)$$

Para o sistema TDMA com uma única célula, desconsiderando-se o tempo de guarda entre as janelas de tempo, a capacidade é dada pela relação entre a taxa de transmissão no canal e a taxa de transmissão associada a cada fonte de informação, conforme a equação (3.3).

Considerando-se múltiplas células, pode-se imaginar um sistema em que as M janelas de tempo de um quadro são divididas em K grupos de janelas, que seriam distribuídos entre as K células do *cluster*, podendo ser reutilizados em outras células, criando-se o conceito de reuso de janela, semelhante ao conceito de reuso de frequência. A capacidade de cada célula fica reduzida pelo fator K , conforme a equação (3.4).

Outra possibilidade é dividir a largura de faixa do sistema em K sub-faixas que seriam distribuídas entre as K células do *cluster*, podendo ser reutilizadas em outras células de outros *clusters*. Neste caso, cada célula teria uma largura de faixa útil para transmissão igual a W/K , que seria compartilhada pelos usuários através de múltiplo acesso TDMA. Este tipo de sistema é denominado de TDMA/FDMA, e tem a mesma capacidade (M) do sistema anterior. A vantagem desta abordagem é que não há necessidade dos quadros de cada célula do *cluster* estarem sincronizados entre si.

Percebe-se então que os sistemas FDMA e TDMA são idênticos quanto ao número de canais suportados (ao menos para dois sistemas ideais), independentemente do número de células no sistema. A afirmativa de que o sistema TDMA tem capacidade maior do que a do FDMA está incorreta. O que se pode afirmar é que o sistema AMPS (FDMA), analógico com 30 kHz de largura de faixa em cada canal, tem menor capacidade que o sistema IS136 (ou IS54) (TDMA), digital, com técnica de codificação de voz e modulação mais eficientes, onde cada faixa de 30 kHz é compartilhada no tempo por 3 ou 6 usuários, dependendo do tipo de codificação de voz utilizado.

Embora mais complexo, o TDMA tem sido preferido em relação ao FDMA nos sistemas mais recentes. Esta opção se dá pelos seguintes fatores [Falconer95] [Calhoun92]:

- O sistema FDMA tem um custo de infra-estrutura mais elevado, pelo fato de cada portadora transportar um único canal.
- A incorporação de uma nova tecnologia ao sistema FDMA demanda a substituição de partes do sistema, uma vez que o mesmo é fortemente baseado em *hardware*. Por exemplo, a incorporação de uma nova técnica de codificação de voz pode ser feita redefinindo o número de janelas no quadro de um sistema TDMA, mas demanda a redefinição dos canais (e do plano de frequência) e a substituição de parte dos equipamentos da estação rádio-base no sistema FDMA.

- A implementação de novos serviços, que demandam uma taxa de transmissão maior, pode ser feita no sistema TDMA alocando-se mais de uma janela por quadro para este tipo de usuário. As características do sistema FDMA praticamente inviabilizam este tipo de facilidade.
- A interrupção da recepção do sinal por um período de tempo muito pequeno durante o *handoff* é imperceptível para transmissão de voz, mas pode ser catastrófica para transmissão de dados. O sistema TDMA pode ser implementado de modo que o *handoff* ocorra no período entre as janelas de transmissão daquele usuário, não acarretando portanto em perda de informação. Já para o sistema FDMA, a perda de informação durante o *handoff* é praticamente inevitável.

1.2.2. CDMA

O máximo número de usuários em um sistema CDMA é limitado pela quantidade de interferência gerada por outros usuários empregando a mesma frequência. Para um sistema com célula única, desconsiderando-se o ruído no canal e outras interferências, tem-se:

$$M = \frac{W/R_t}{E_b/N_0} + 1 \quad (3.5)$$

Para um sistema com múltiplas células, todas operando com a mesma frequência, o nível de interferência em uma célula cresce devido a transmissões provenientes de outras células. Assim, tem-se uma redução na capacidade de cada célula, que pode ser escrita, desprezando-se o termo unitário na expressão (3.5), como:

$$M = \frac{W/R_t}{E_b/N_0} \cdot \varphi \quad (3.6)$$

Onde φ é o fator de perda de capacidade devido a interferência proveniente de outras células. O valor de φ depende do número de células interferentes, do tráfego existente nessas células e da lei de propagação no sistema. O valor preciso de φ é difícil de ser calculado, o modelo apresentado por Guilhousen em [Guilhousen91] apresentou valores variando de 1 (com todas as outras células vazias, que corresponde precisamente ao caso de célula única) até 0.6 (com todas as outras células cheias), o valor de 0.66 aparece em [Webb98] e [Kohn95].

A utilização de um sistema misto CDMA/FDMA, com fator de reuso de frequência maior do que 1, resultaria em um aumento no valor de φ , uma vez que a frequência de operação das células de um *cluster* seriam diferentes e, portanto, uma dada célula só sofreria interferência adicional de outras células pertencentes a outros *clusters*. Por outro lado, a capacidade de cada célula seria reduzida pelo fator de reuso de frequências, ou seja:

$$M = \frac{W/R_t}{E_b/N_0} \cdot \frac{1}{K} \cdot \varphi \quad (3.7)$$

Comparando-se com a técnica TDMA tem-se:

- Para sistemas com célula única a capacidade do CDMA é menor, ao menos para os valores de λ e E_b/N_0 usuais.
- Para sistemas com múltiplas células, considerando-se o CDMA com fator de reuso $K = 1$, tem-se a seguinte relação entre a capacidade do CDMA e do TDMA

$$\frac{M_{cdma}}{M_{tdma}} = \frac{\varphi \cdot K}{(E_b/N_0) \cdot \alpha} \quad (3.8)$$

O CDMA pode ter capacidade maior ou menor que o TDMA, dependendo dos parâmetros do sistema. Por exemplo, tomando-se a modulação como BPSK ($\alpha = 1$), $\varphi = 0.66$ e um fator de reuso $K = 7$ para o TDMA (largamente utilizado na prática), tem-se $N_{cdma}/N_{tdma} = 4.62/(E_b/N_0)$. Para modulação BPSK com demodulação coerente, considerando-se uma taxa de erro de bit máximo de 10^{-3} , tem-se E_b/N_0 mínimo igual a 5, e a capacidade do CDMA é ligeiramente inferior à capacidade do TDMA.

Estas comparações não devem ser tomadas de forma definitiva, uma vez que uma série de outros fatores influenciam de forma significativa a capacidade destes sistemas.

1.2.3. OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM A CAPACIDADE DOS SISTEMAS

A capacidade do sistema TDMA pode ser aumentada pela redução da taxa de bits na fonte, pelo aumento da eficiência de largura de faixa da técnica de modulação, pelo decréscimo do fator de reuso de frequência, e pela melhor utilização das janelas de tempo, aproveitando-se os momentos de silêncio da conversação. O sistema CDMA, por sua vez, pode ter sua capacidade incrementada pela redução do nível de interferência no sistema e pela diminuição dos requisitos de E_b/N_0 .

Alguns fatores que influenciam o desempenho de sistemas de comunicações móveis com múltiplo acesso TDMA ou CDMA são tratados a seguir:

MONITORAÇÃO DE ATIVIDADE DE VOZ: Em uma conversação típica, o percentual de tempo que um indivíduo gera sinal de voz está entre 35 e 40%. Esta característica pode ser utilizada para incrementar a capacidade dos sistemas TDMA e CDMA.

Define-se para o sistema CDMA um fator de atividade de voz, que contabiliza a redução no nível de interferência devido ao fato do sinal de voz não estar presente o tempo todo em uma conversação. A redução na interferência pode ser obtida pela desativação da portadora nos momentos de silêncio ou pela redução da taxa de dados durante os períodos de silêncio, sendo que neste último caso o valor de E_b é mantido constante, ou seja, a potência de transmissão é reduzida. A redução da taxa reproduz um ruído de fundo no canal, que é mais aceitável para o usuário do que a completa ausência de sinal. O valor do fator de atividade de voz pode ser determinado por [Monsen95]:

$$v = f_v \cdot [v_a + (1 - v_a)r_f] + (1 - f_v) \quad (3.9)$$

onde,

- f_v = percentual de usuários de voz no sistema;
- v_a = probabilidade de um usuário de voz estar ativo;
- r_f = fator de redução da taxa de dados.

Considerando-se que a totalidade dos usuários do sistema transmitem sinais de voz ($f_v = 1$), e que a portadora é desativada nos momentos de silêncio ($r_f = 0$), tem-se o mínimo valor possível para o fator de atividade de voz, que é $v = v_a = 0.35$ a 0.4 .

Em uma primeira aproximação pode-se afirmar que a capacidade do sistema CDMA pode ser acrescida pelo fator $1/v$. Uma análise mais cuidadosa mostra no entanto que o acréscimo é inferior a este, pois em um ambiente com um número limitado de chamadas por célula existe a probabilidade (não negligenciável) de se ter um número médio de usuários com sinal de voz presente simultaneamente superior ao definido por Nv [Guilhouses91].

Para o sistema TDMA esta característica pode ser utilizada para se implementar o conceito de DSI (*Digital Speech Interpolation*), onde se aproveita os períodos de silêncio de uma conversação para transmissão de rajadas de outra(s) conversação(ões). O sistema E-TDMA (*Extended TDMA*) proposto pela Hughes Network Systems, Alcatel e IMM utiliza este conceito, com um ganho de capacidade de 2.5 vezes se comparado com o sistema TDMA normal [Calhoun92].

Em resumo, as características de transmissão de voz pode resultar no aumento da capacidade para os sistemas TDMA e CDMA, com a mesma ordem de grandeza para os dois sistemas. A vantagem do CDMA neste caso é a menor complexidade do sistema.

SETORIZAÇÃO: A divisão das células em setores, através do uso de antenas diretivas, reduz o nível de sinal interferente no sistema CDMA, acarretando um aumento de capacidade. Por exemplo, com três antenas de 120° por célula as fontes de interferência vistas pela

antena da estação rádio-base, considerando-se que os usuários estão distribuídos de forma homogênea em toda a célula, é $1/3$ das que seriam vistas por uma antena omnidirecional. Portanto, o número de usuários interferentes seria $(M-1)/3$, resultando em um acréscimo de capacidade de 3 vezes. Em um sistema com múltiplas células o uso de setorização também reduziria por 3 o número de células vizinhas interferentes. Este resultado só é obtido idealmente, o fator de melhoria real depende do diagrama de irradiação da antena da estação rádio-base.

Para um sistema TDMA com múltiplas células, a setorização diminui o nível de interferência co-canal por reuso de frequência em outras células, permitindo assim a utilização de *clusters* com tamanho menor e, portanto, com fator de reuso de frequência menor, resultando também em um acréscimo de capacidade. Por exemplo, para uma relação C/I de 18 dB, o fator de reuso de frequência é $K = 7$ para um sistema sem setorização, $K = 4$ para um sistema com 3 setores de 120° , e $K = 3$ para um sistema com 6 setores de 60° [Garg96].

A setorização resulta portanto em um acréscimo de capacidade para ambos os sistemas, sendo este incremento mais acentuado para o sistema CDMA.

CONTROLE DE POTÊNCIA: Em um sistema de comunicações móveis pode-se ter um usuário muito mais próximo da estação rádio-base que outro, resultando em um nível de potência recebido diferente. Para contornar este problema (*near-far problem*) implementa-se mecanismos de controle de potência de transmissão nos sistemas CDMA.

O controle da potência de transmissão não influencia o desempenho do sistema TDMA, mas é determinante para o CDMA. Por exemplo, se um móvel qualquer transmite com o dobro da potência estabelecida (um erro de 3 dB no controle de potência para um único móvel), a capacidade do sistema se reduziria em uma estação, pois a estação fora de controle estaria produzindo um sinal interferente equivalente a duas estações com controle perfeito de potência.

Mesmo que se consiga um controle de potência perfeito dentro da célula, não se pode garantir que sinais interferentes provenientes de células vizinhas não cheguem com intensidade acima da tolerada, especialmente se os sinais das diferentes células sofrerem desvanecimentos diferentes [Pickholtz91].

O cálculo da capacidade de um sistema CDMA real deve portanto incluir um fator (ξ) de redução devido às imperfeições no controle de potência. O valor $\xi = 0.8$ é utilizado em [Garg96].

RUÍDO TÉRMICO NO CANAL: A presença de ruído térmico no canal não influencia a capacidade do sistema TDMA, mas resulta na diminuição da capacidade do sistema CDMA, uma vez que o nível de interferência co-canal admitido no sistema seria reduzido de um valor idêntico ao nível de ruído térmico no mesmo. A capacidade do sistema se reduziria de um fator igual ao inverso da relação sinal-ruído térmico no canal.

USO DE CÓDIGOS PARA CORREÇÃO AUTOMÁTICA DE ERRO: A utilização de FEC (*Forward Error Correction*) no sistema CDMA resulta na diminuição dos requisitos de E_b/N_0 para se alcançar a probabilidade de erro de bit desejável, e na diminuição do ganho de processamento (β) por um fator igual à taxa do código (r). Já no sistema TDMA o uso de FEC permite que se tenha um maior nível de interferência co-canal, possibilitando um menor fator de reuso, mas também resulta no aumento da taxa de transmissão associada a cada canal de um fator igual a $1/r$. Portanto, para os dois sistemas tem-se um efeito que resulta no aumento de capacidade e outro que resulta na diminuição da mesma [Kohn95] [Pichholtz91].

FATOR DE REUSO: A diminuição de capacidade devido ao fator de reuso no sistema TDMA com múltiplas células pode ser minimizada através de uma técnica denominada *Dynamic Channel Allocation* (DCA). Nesta técnica, ao invés de se dividir as frequências entre as diferentes células, permite-se que cada célula tenha acesso a todas as frequências. Antes de iniciar uma transmissão, a estação mede a interferência presente em cada frequência e opta dinamicamente por aquela com menor interferência [Webb98] [Falconer95].

O aumento de capacidade resultante do uso de DCA depende do tipo de sistema. Em [Raith91] melhorias de 1.5 a 2 para sistemas grandes e de 3 a 4 para sistemas pequenos são reportadas.

Webb propõem o cálculo do incremento da capacidade do sistema através do conceito de fator efetivo de reuso, que pode ser calculado por [Webb98]:

$$K_{DCA} = \frac{K_{FCA}^2 + 1}{2K_{FCA}} \quad (3.10)$$

Onde, K_{DCA} e K_{FCA} são o tamanho efetivo do *cluster* com alocação dinâmica e fixa respectivamente. Por exemplo, para $K_{FCA} = 3$, tem-se $K_{DCA} = 1.66$, resultando em uma aumento de capacidade de 1.8 vezes. Os sistemas DECT e PHS oferecem esta facilidade.

USO DE MODULAÇÃO COM MAIOR VALOR DE α : O aumento no valor da eficiência de largura de faixa da modulação afeta diretamente a capacidade do TDMA. Modulações com maior eficiência precisam, tipicamente, de uma maior relação E_b/N_0 para uma dada taxa de erro especificada. Assim, a utilização de modulação com maior valor de α implica no aumento do fator de reuso de frequências, melhorando a relação C/I do sistema. Este compromisso tem limitado, nos sistemas atuais, o uso de modulações com $\alpha \leq 2$.

Para o sistema CDMA, o uso de modulação com maior valor de α não traz vantagem.

UTILIZAÇÃO DE MAIORES TAXAS DE TRANSMISSÃO PARA SERVIÇOS ESPECIAIS: O atendimento de serviços que demandam taxas de transmissão maiores pode ser feito no sistema TDMA alocando-se mais de uma janela (ou uma janela maior) para estes usuários, com a conseqüente redução na capacidade de atendimento dos usuários do serviço básico. Para o CDMA isto poderia ser feito alterando-se o ganho de processamento. Com

isto, os usuários do serviço especial passariam a tolerar um menor nível de interferência, reduzindo-se a capacidade do sistema como um todo.

As expressões (3.11) e (3.12) incorporam alguns dos fatores acima às expressões (3.4) e (3.7), para o cálculo da capacidade de sistemas TDMA e CDMA, respectivamente.

$$M_{tdma} = \frac{W\alpha}{R} \cdot \frac{1}{K_{DCA}} \cdot G_v \cdot r \quad (3.11)$$

$$M_{cdma} = \frac{\beta \cdot r}{E_b/N_0} \cdot \frac{1}{K} \cdot \varphi \cdot \frac{1}{v} \cdot N_s \cdot \xi \quad (3.12)$$

onde G_v é o ganho de capacidade pelo uso de DSI em sistemas TDMA e N_s é o número de setores.

Considerando-se K igual a 1, controle de potência perfeito e ruído térmico no canal desprezível para o sistema CDMA, e o uso de DCA no sistema TDMA, tem-se:

$$\frac{M_{tdma}}{M_{cdma}} = \frac{\alpha \cdot G_v \cdot \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \cdot v}{K_{DCA} \cdot \varphi \cdot N_s} \quad (3.13)$$

Alguns valores típicos para estes parâmetros são: $\alpha = 2$, $v = 0.35$, $N_s = 3$, $\varphi = 0.66$, $K_{DCA} = 1.66$ (para $K_{FCA} = 3$), $E_b/N_0 = 5$ [Webb98][Falconer95][Padgett95][Guilhouse91].

Substituindo-se em (3.13), tem-se:

$$\frac{M_{tdma}}{M_{cdma}} \cong G_v \quad (3.14)$$

Ou seja, um sistema TDMA que não utiliza o DSI possui praticamente a mesma capacidade de um sistema CDMA.

2. SISTEMAS WIRELESS LOCAL LOOP (WLL)

O par metálico foi sempre a principal forma de conexão dos usuários à rede telefônica. Este tipo de rede de acesso, apesar de simples na sua concepção, sempre se caracterizou por prazos de implantação longos, com custos elevados e intensa utilização de mão de obra. Apesar dos avanços tecnológicos, que permitiram uma utilização mais eficiente do meio, as características básicas associadas aos processos de instalação e manutenção se mantiveram.

O desenvolvimento dos sistemas de comunicação sem fio, alavancado pela telefonia móvel celular, permitiu o surgimento de novas e importantes aplicações, como a rede de acesso sem fio, permitindo aos operadores de redes de telecomunicações prover a expansão de suas redes de forma rápida, com um menor custo de implantação (particularmente em regiões com baixa densidade demográfica ou com topografia desfavorável) e manutenção, e maior flexibilidade no planejamento e desenvolvimento do sistema. Além disso, a rede WLL apresenta características que permitem sua implementação em um prazo bastante curto, permitindo ativar um sistema em um período entre 90 e 120 dias [AMD98], resultando em vantagem significativa em um ambiente com várias operadoras competindo entre si. Algumas previsões apontam os sistemas WLL como a tecnologia de acesso que terá a maior taxa de crescimento na próxima década [AMD98] [Bernardini98].

As duas abordagens básicas para o sistema WLL são [Garg96b]:

- Os usuários acessam a rede com fio através de estações rádio-base que estão conectadas diretamente a central telefônica, como mostra a Figura 3.4.
- As estações rádio-base estão conectadas a uma central tipo PBX (*Private Branch Exchange*), que por sua vez está conectada a central telefônica que faz então a conexão com a rede com fio, conforme ilustrado na Figura 3.5.

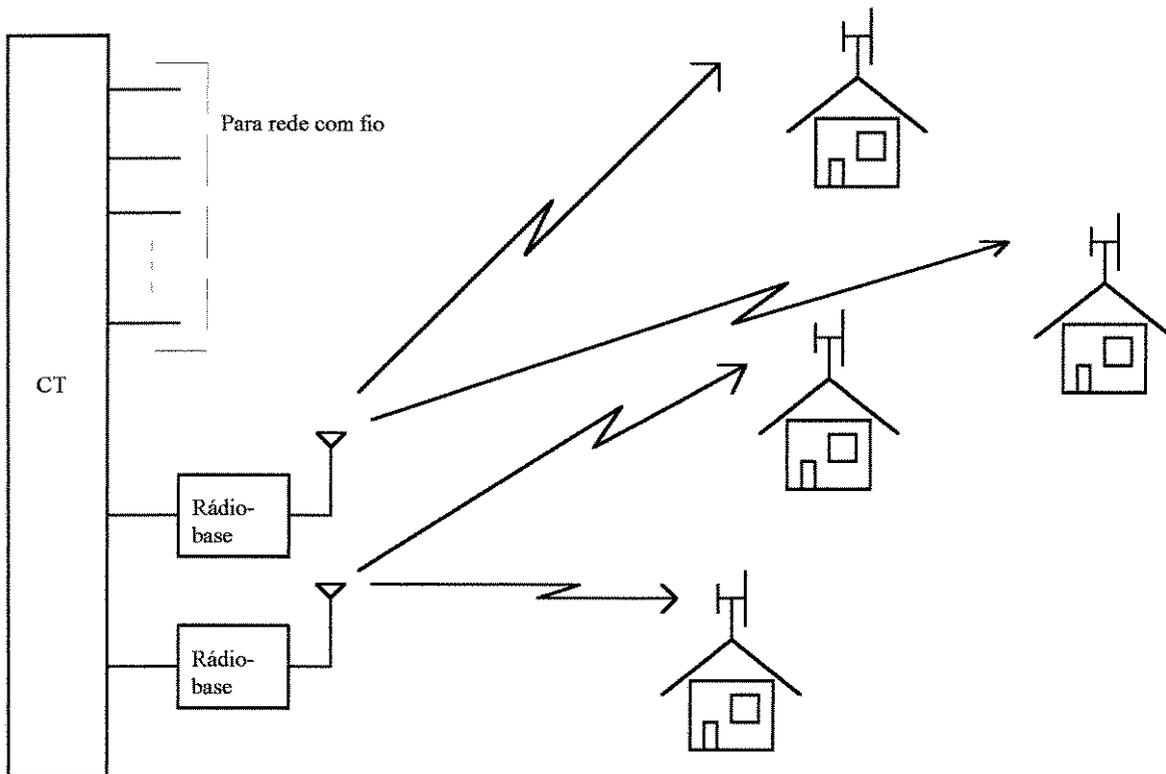


Figura 3.4. - Estação rádio-base conectada diretamente à central telefônica.

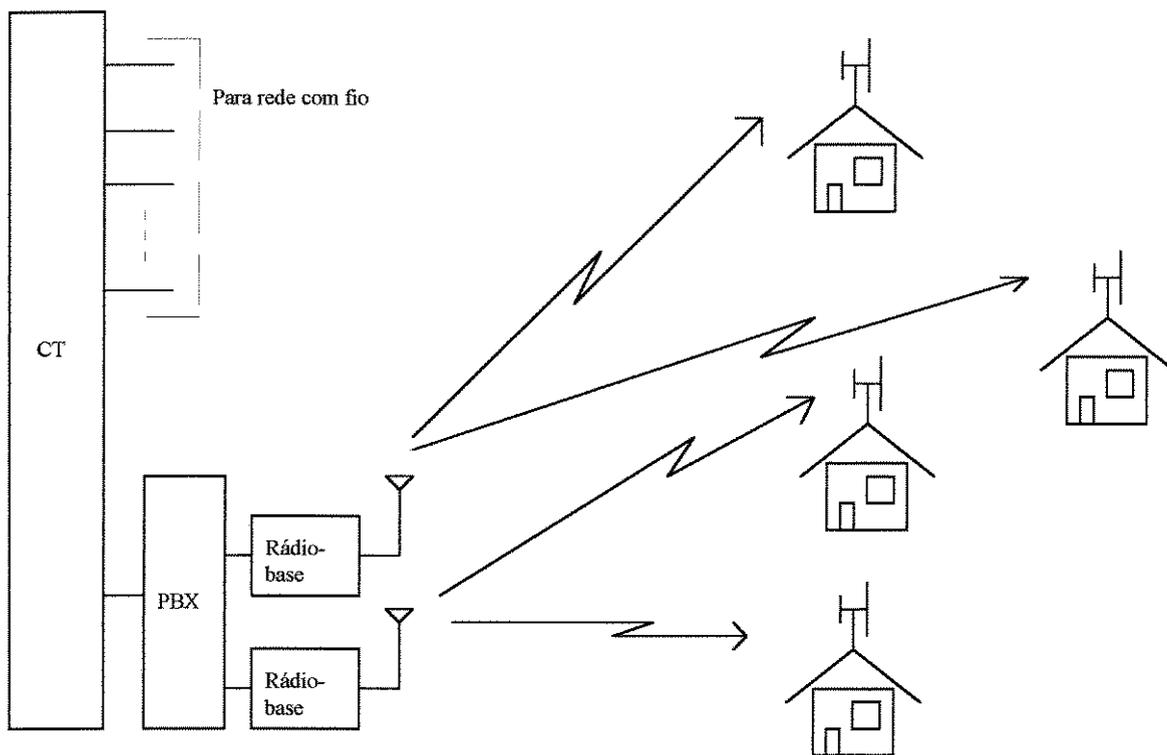


Figura 3.5 - Estação rádio-base conectada a central telefônica via PBX.

Para se tornar atrativo tanto do ponto de vista da operadora quanto do usuário, o sistema WLL deve, idealmente, ter os seguintes atributos [Garg96b][Bernardini98]:

- Baixo custo, de modo a oferecer atratividade econômica se comparado à solução da rede com fio ou com os sistemas móveis celulares;
- Ser capaz de operar em pequenas células, para atender áreas urbanas com grande densidade demográfica;
- Ser transparente ao usuário, oferecendo os serviços hoje disponíveis na rede telefônica;
- Suportar serviços da Rede Digital de Serviços Integrados, permitindo tráfego de voz e dados;
- Oferecer segurança, de modo que o usuário tenha garantia de confidencialidade das suas comunicações;
- Possuir mecanismos de autenticação, para evitar uso fraudulento;
- Permitir a utilização de comutadores digitais convencionais, utilizando-se da maturidade existente nestes equipamentos e da competitividade existente neste mercado.

2.1. PROTOCOLOS DE MÚLTIPLO ACESSO

Os produtos e sistemas WLL oferecidos ao mercado têm se baseado em tecnologias utilizadas inicialmente em sistemas móveis celulares, sistemas de comunicação pessoal ou em sistemas PBX sem fio, resultando em sistemas com qualidade de voz inferior à obtida em redes com fio, e com limitação para transmissão de dados. A Tabela 3.1 resume os sistemas WLL de alguns dos principais fabricantes mundiais, indicando a tecnologia de acesso utilizada. Os dois principais protocolos de acesso utilizados nos sistemas WLL são o TDMA (representado pelos sistemas DECT, GSM, PHS, PDC, IS-136 e sistemas proprietários) e o CDMA (representado pelo sistema IS95 e sistemas proprietários) [Meira98].

Os sistemas listados na Tabela 3.1 foram testados no Brasil pelo CPqD. A tecnologia TDMA (principalmente DECT) vem sendo utilizada em países como a Inglaterra, França, Itália, Suécia, Finlândia, Argentina, Indonésia e Uruguai; enquanto a tecnologia CDMA vem sendo adotada na Hungria, República Tcheca, China, Polônia, Índia e Rússia [Meira98] [Bernardini98].

FABRICANTE	PRODUTO	TECNOLOGIA DE ACESSO
Icatel	corDECT	TDMA (DECT)
Alcatel Telecom	A9800	TDMA
Equitel	DECTlink	TDMA (DECT)
Ericsson	GSM 1900	TDMA (GSM)
Ericsson	D-AMPS 1900	TDMA (IS 136)
Ericsson	PDC 1500	TDMA (PDC)
Ericsson	DRA 1900	TDMA (DECT)
Lucent	Swing	TDMA (DECT)

Motorola	WiLL	CDMA (IS95)
NEC	NEAX PHS Starnet	TDMA (PHS)
NEC	DCTS	TDMA (PHS)
NEC	DRMASS	TDMA
ArrayComm	Intelicell-WLL	TDMA (PHS)
Nokia	Easywave	TDMA (GSM)
Lucent	Airloop	CDMA
Nortel	Proximity I	TDMA
Qualcomm	QcTel	CDMA (IS95)

Tabela 3.1 - Produtos para WLL.

2.2. COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO

A análise do desempenho das técnicas de acesso para os sistemas WLL pode ser feita a partir dos resultados obtidos para sistemas de comunicações móveis, considerando-se as seguintes diferenças básicas [Lee98] [Garg96b]:

CONDIÇÕES DE PROPAGAÇÃO e E_b/N_0 REQUERIDO: No sistema WLL as estações são fixas e as antenas podem ser colocadas em pontos elevados. Com isto, as condições de propagação são mais favoráveis do que as obtidas em sistemas móveis, os problemas de desvanecimento multipercurso são significativamente diminuídos, resultando numa menor relação E_b/N_0 mínima requerida. O valor típico de 7 dB para um sistema móvel utilizando CDMA pode ser reduzido para algo entre 4.5 e 6 dB, enquanto o valor de 18 dB para um sistema TDMA IS-136 pode ser reduzido para 14 dB.

NÍVEL DE INTERFERÊNCIA: Nos sistemas WLL é possível utilizar antenas diretivas tanto na estação rádio-base quanto nas estações remotas. Esta característica reduz o nível de sinal interferente na rádio-base e nas estações remotas de um sistema com múltiplas células.

Utilizando-se a expressão (3.13), desprezando-se o sinal interferente proveniente de outras células, devido ao uso de antenas diretivas nas estações remotas, tem-se:

$$\frac{M_{tdma}}{M_{cdma}} = \frac{\alpha \cdot G_v \cdot \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \cdot \nu}{K_{DCA} \cdot N_S} \quad (3.15)$$

Considerando-se $K_{DCA} = 1.66$, $\nu = 0.35$, $N_S = 3$, $\alpha = 2$, e $G_v = 1$, tem-se:

$$\frac{M_{tdma}}{M_{cdma}} = 0.14 \cdot \frac{E_b}{N_0} \quad (3.16)$$

Portanto $M_{tdma} < M_{cdma}$ para $E_b/N_0 < 8.5$ dB, o que normalmente ocorre para os sistemas CDMA, considerando-se transmissão de voz.

O resultado apresentado pela expressão (3.16) é válido para sistemas com múltiplas células. Em sistemas com célula única, que podem ocorrer com frequência nas aplicações WLL, o CDMA apresenta melhor desempenho para $E_b/N_0 < 6.3$ dB.

A Tabela 3.2 mostra uma comparação entre os sistemas IS-95 (CDMA), IS-136 (TDMA) e GSM (TDMA), admitindo-se uma largura de faixa total disponível de 5 MHz e os parâmetros de cada padrão [Garg96b].

Parâmetro	IS-95	IS-136	GSM
E_b/N_0 de projeto	6 (dB)	14 (dB)	12 (dB)
Fator de reuso (K)	1	4	3
Fator de controle de potência (ξ)	0.85	-	-
Interferência de células vizinhas	0.66	-	-
Fator de atividade de voz	0.6	-	-
No de setores	3	3	3
Capacidade obtida (canais/setor)	93	41.76	22.24

Tabela 3.2 - Comparação entre IS-95, IS-136 e GSM.

3. PACKET RESERVATION MULTIPLE ACCESS (PRMA)

As novas redes de comunicação sem fio devem transportar diversos tipos de informação, tais como voz, dados e imagem, além de um grande volume de tráfego de controle. Os protocolos TDMA e CDMA apresentam deficiências quando a rede possui um perfil de tráfego misto. No TDMA, pode-se alocar mais de uma janela de tempo em um quadro para os usuários com maior demanda de taxa de transmissão, mas a alocação fixa resulta em má utilização das janelas alocadas para fontes com tráfego em rajadas. No CDMA, a existência de estações com taxa de transmissão mais elevada, transmitindo dados, reduz a capacidade da rede. O protocolo PRMA (*Packet Reservation Multiple Access*) vem sendo proposto como solução adequada para estas novas redes [Goodman89] [Goodman90] [Goodman91].

O PRMA é um protocolo híbrido resultante da combinação dos protocolos *Slotted-Aloha* e TDMA, adequado para redes de comunicação sem fio com topologia em estrela, onde todas as estações remotas transmitem para uma estação rádio-base. O canal é dividido no tempo em quadros, que por sua vez são divididos em janelas, que são utilizadas para transmissão de pacotes da estação remota para a estação rádio-base. Os pacotes são classificados em periódicos (por exemplo, pacotes de voz) ou não-periódicos (por exemplo, dados com perfil de tráfego em rajadas). A duração do quadro é definida de maneira que um terminal de voz transmita um pacote (periódico) por quadro.

Com base em informações enviadas, no modo *broadcast*, pela estação rádio-base no quadro anterior, as estações remotas associam a cada janela do quadro corrente um *status* de janela disponível ou ocupada. Terminais com novos pacotes para transmitir disputam as janelas disponíveis com base na técnica *Slotted-Aloha*; o terminal busca uma janela disponível e transmite na mesma com probabilidade p , que é uma constante de projeto denominada probabilidade de permissão.

Ao fim de cada janela, a estação rádio-base envia em modo *broadcast* uma mensagem de reconhecimento indicando se o pacote daquela janela foi recebido com sucesso. Cada pacote possui um bit que o classifica como um pacote periódico ou não-periódico. Quando uma estação remota transmite com sucesso um pacote do tipo periódico em uma dada janela de um quadro, as janelas de mesma posição dos quadros seguintes ficam reservadas para aquele terminal, sendo classificadas pelos demais terminais como janela ocupada. Quando a estação remota deixa de transmitir seu sinal periódico na janela reservada, a estação rádio-base envia uma mensagem do tipo *broadcast* informando esta ocorrência para todas as demais estações remotas da rede, que passam a classificar esta janela como disponível. A transmissão de pacotes não-periódicos não resulta em reservas de janelas; ou seja, todo pacote não-periódico será transmitido com base no protocolo *Slotted-Aloha*.

A Figura 3.6 ilustra a operação do PRMA em uma rede onde cada quadro é dividido em 8 janelas. Admitindo-se que todos os pacotes transmitidos são do tipo periódico, os seguintes eventos podem ser observados:

- As transmissões efetuadas no quadro $k-1$ resultaram em 6 janelas reservadas e 2 disponíveis no quadro k , sendo que as janelas reservadas estão associadas às estações remotas 11,5,3,1,8 e 2;
- No início do quadro k , as estações 6 e 4 desejam transmitir um pacote, ambas as estações tentam transmitir na janela de número 3, causando uma colisão. Na janela de número 7 ambas as estações não obtêm permissão de transmissão (que é definida pela probabilidade q), iniciando o quadro $k+1$ ainda com os pacotes por transmitir;
- No quadro k , a estação 3 não transmitiu na janela reservada; assim, no quadro $k+1$ a janela de número 4 é classificada como disponível;
- As estações 6 e 4 conseguem permissão para transmitir nas janelas disponíveis de número 7 e 4, respectivamente, passando estas janelas a estarem reservadas a partir do quadro $k+2$;
- A estação 8 não transmite na janela reservada (janela 6) no quadro $k+1$, passando esta janela a estar disponível a partir do quadro $k+2$;
- No quadro $k+2$, a estação 12 ocupa a janela (disponível) número 3 e a estação 1 deixa de transmitir na janela (reservada) número 5.

número da janela	1	2	3	4	5	6	7	8	
status da janela	R11	R5	D	R3	R1	R8	D	R2	quadro k
estação transmitindo	11	5	6,4	-	1	8	-	2	
número da janela	1	2	3	4	5	6	7	8	
status da janela	R11	R5	D	D	R1	R8	D	R2	quadro k+1
estação transmitindo	11	5	-	4	1	-	6	2	
número da janela	1	2	3	4	5	6	7	8	
status da janela	R11	R5	D	R4	R1	D	R6	R2	quadro k+2
estação transmitindo	11	5	12	4	-	-	6	2	

Status das janelas

RX: janela reservada para estação X

D: janela disponível

Figura 3.6 - Exemplo de operação do protocolo PRMA.

Se ocorrer uma colisão com o primeiro pacote periódico transmitido por uma estação remota, esta irá retransmitir o pacote, com probabilidade q , nas janelas disponíveis subsequentes, até que a estação rádio-base confirme a recepção correta do pacote, quando então a estação remota terá ganho a reserva de uma janela para transmitir os próximos pacotes periódicos. Se o pacote é não-periódico, a retransmissão ocorre com probabilidade r . Ajustando-se os valores de q e r pode-se estabelecer prioridade estatística para pacotes periódicos ou não-periódicos.

A qualquer instante, o número de janelas disponíveis depende do número de estações remotas transmitindo. Com poucas janelas disponíveis, o tempo necessário para que uma estação que deseje iniciar uma transmissão consiga transmitir um pacote com sucesso pode ser significativo. Para pacotes de dados este atraso pode ser contornado através de armazenamento em *buffer*; para pacotes de voz o armazenamento não é possível, uma vez que a ocorrência de atraso acima de determinados limites torna a transmissão dos pacotes de voz inútil. O PRMA contorna este problema descartando os pacotes de voz que tiverem sofrido um atraso de acesso superior a um valor D_{\max} estipulado (32 ms, por exemplo). O descarte de pacotes de voz resulta na diminuição da qualidade de comunicação, tornando o parâmetro

probabilidade de descarte de pacotes periódicos, P_{drop} , importante para a análise do desempenho do protocolo.

A capacidade do PRMA pode ser definida como o número máximo de estações que podem compartilhar um canal comum para um dado valor de P_{drop} especificado. Valores de P_{drop} abaixo de 0.01 resultam em um padrão de qualidade aceitável para a transmissão de voz [Goodman91].

Resultados de simulação apresentados em [Goodman91] para um sistema onde todas estações transmitem sinais de voz, com $P_{drop} \leq 0.01$, $D_{max} = 32$ ms, e 64 bits de *overhead* por pacote, mostram que o número máximo admissível de estações ativas para o sistema PRMA, operando com detecção de atividade de voz, é entre 1.16 e 1.69 vezes superior ao número máximo admissível para um sistema TDMA perfeito (sem *overhead*) sem detecção de atividade de voz. Considerando um fator de atividade de voz de 0.4, o limite superior de capacidade de um sistema TDMA perfeito (sem *overhead*) com detecção de atividade de voz seria 2.5 vezes a capacidade obtida sem detecção de atividade de voz. Os parâmetros do sistema PRMA que afetam seu desempenho são:

PROBABILIDADE DE PERMISSÃO: Se p é pequeno, o atraso de acesso dos pacotes aumenta, podendo resultar no aumento da taxa de descarte de pacotes periódicos. Além disso, um valor de p pequeno pode resultar em mau aproveitamento de janelas disponíveis em situação de baixa carga. Se p é grande o número de colisões aumenta, acarretando desperdício de recurso de comunicação e aumento no atraso de acesso, com conseqüente aumento em P_{drop} . Este comportamento indica a existência de um valor apropriado para p . A escolha do valor de p é importante também por razões de estabilidade, valores de p elevados produzem no PRMA os mesmos problemas de estabilidade dos protocolos Aloha.

PROBABILIDADE DE DESCARTE DE PACOTES PERIÓDICOS: Menores valores especificados para P_{drop} resultam na diminuição da capacidade do sistema, com aumento de qualidade. Uma redução na especificação de P_{drop} de 0.01 para 0.005 reduz a capacidade do sistema em 5%.

DETECÇÃO DE ATIVIDADE DE VOZ: O sinal de voz é caracterizado por momentos de atividade e momentos de silêncio, onde os momentos de silêncio possuem duração média superior aos momentos de atividade. O desligamento da portadora nos momentos de silêncio libera as janelas reservadas para utilização por outras estações da rede, aumentando a capacidade do sistema.

LIMITE PARA O DESCARTE DE PACOTES PERIÓDICOS: Quanto maior o valor de D_{max} menor o valor de P_{drop} e maior a capacidade do sistema. No entanto, um limite superior ao valor de D_{max} é imposto por questões de qualidade da transmissão do sinal de voz.

A vazão no PRMA varia de acordo com os diversos parâmetros citados, valores entre 0.48 e 0.68 são reportados em [Goodman91].

A capacidade do PRMA pode ser incrementada se o receptor é capaz de detectar, no caso de colisão, o pacote com maior nível de potência [Qiu96].

4. CONCLUSÃO

A partir da descrição dos sistemas de comunicações móveis terrestres e WLL foi realizada a análise dos dois principais protocolos de múltiplo acesso utilizados nestes sistemas: TDMA e CDMA. Mostrou-se que a relação entre a capacidade dos dois protocolos é fortemente dependente de características de implementação dos mesmos, não podendo-se chegar a uma conclusão taxativa de qual protocolo é mais indicado para estes sistemas. O protocolo PRMA foi também descrito e os fatores que influenciam seu desempenho foram analisados, evidenciando sua possibilidade de uso nos sistemas móveis de terceira geração e WLL.

CAPÍTULO IV - REDES DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE

Em 1965 o lançamento do primeiro satélite comercial em órbita geoestacionária, denominado Intelsat I ou Early Bird, deu início ao desenvolvimento das redes de comunicação por satélite. Hoje, as comunicações por satélite são largamente utilizadas para a implementação de redes públicas ou privadas para o atendimento dos mais diversos tipos de comunicação.

Os sistemas de comunicação por satélite são compostos das estações terrenas, cujas dimensões variam de acordo com o tipo de rede, e do satélite, que está em órbita em torno da terra. O enlace de comunicação da estação terrena para o satélite é denominado de *uplink*, e o enlace do satélite para a estação terrena de *downlink*. As faixas de frequência usualmente utilizadas são: Banda L (1-2 GHz), Banda C (4-8 GHz), Banda X (8-12 GHz), Banda Ku (12-18 GHz) e Banda Ka (27-40 GHz).

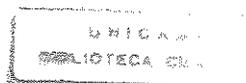
As comunicações por satélite apresentam algumas vantagens sobre as redes terrestres, tais como:

- Facilidade para alcançar regiões remotas;
- Grande facilidade para transmissão em *broadcast* e *multicast*;
- Flexibilidade para o crescimento e/ou reconfiguração do sistema;
- Grande área de cobertura, particularmente para satélites geoestacionários, permitindo a interconexão com facilidade de estações separadas por grandes distâncias;
- Custo de comunicação praticamente independente da distância entre as estações.

A órbita do satélite pode ser classificada, em função da sua altitude, em: geoestacionária (GEO - *Geostationary Satellite Orbit*), de média altitude (MEO - *Medium Earth Orbit*), e de baixa altitude (LEO - *Low Earth Orbit*).

ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA: O satélite está a uma altitude em torno de 35.780 km resultando em um tempo de propagação elevado, em torno de 250 ms, e em uma elevada atenuação no espaço livre, em torno de 195 dB no *downlink* para um satélite operando na banda C. O satélite está em órbita sobre o equador e possui a mesma velocidade angular da terra, portanto o satélite está permanentemente visível para uma estação terrena dentro da área de cobertura do mesmo. Esta característica resulta em redes de menor complexidade, quando comparado com os outros tipos de órbita. A área de cobertura é grande, bastando três satélites para se cobrir toda a Terra, com exceção das regiões com latitudes superiores a 81 graus, que não podem ser cobertas por este tipo de satélite.

ÓRBITA DE MÉDIA ALTITUDE: Órbitas com altitude entre 10.000 e 20.000 km são definidas como MEO. A menor altitude, comparada com as órbitas GEO, resulta em menor tempo de propagação, menor atenuação no espaço livre, e menor área de cobertura. A velocidade angular maior do que a velocidade da terra faz com que o satélite não fique visível o



tempo todo, fazendo com que as estações terrenas tenham que comutar a recepção de um satélite para outro (*hand-off*) para manter a comunicação, mesmo que a estação terrena seja fixa.

ÓRBITA DE BAIXA ALTITUDE: As órbitas LEO possuem altitude inferior a 1.500 km. A grande vantagem é a baixa atenuação no espaço e o pequeno atraso de propagação. A desvantagem é o elevado custo e complexidade das redes. Este tipo de órbita apresenta a menor atenuação no espaço livre e o menor atraso de propagação. Por outro lado, elas apresentam a menor área de cobertura do satélite, resultando na necessidade de um maior número de satélites para se obter cobertura global, e a maior velocidade angular do satélite, diminuindo o tempo de visibilidade de cada satélite e aumentando a taxa de ocorrência de *hand-off*, o que resulta em redes mais complexas e de maior custo.

A maior parte dos sistemas de comunicação por satélite utilizam órbita geoestacionária. As exceções são os sistemas de comunicações móveis, que precisam de órbitas mais baixas para facilitar a utilização de terminais portáteis e diminuir o atraso de propagação, onde a órbita mais comumente utilizada é a LEO, embora alguns sistemas utilizem MEO.

A Figura 4.1 ilustra a estrutura típica de uma rede de comunicação por satélite com órbita geoestacionária. As estações terrenas transmitem seus sinais para o satélite que os retransmite para a terra após efetuar uma translação de frequência. A largura de faixa total do satélite é dividida em sub-faixas. O satélite atua como um repetidor, ou seja, o sinal em cada sub-faixa é amplificado, transladado em frequência, amplificado novamente e transmitido por um conjunto de circuitos denominado *transponder*. Cada *transponder* pode ser compartilhado entre diversas estações terrenas através de técnicas de múltiplo acesso. As características da estação terrena dependem do tipo de rede. Por exemplo, uma estação Intelsat classe A operando em banda C utiliza antenas com 30 metros de diâmetro, enquanto uma estação VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) operando em banda Ku pode utilizar antenas de 90 cm de diâmetro.

Em redes com órbita baixa, devido à menor área de cobertura de cada satélite, pode se tornar necessário a utilização de enlaces entre satélites para garantir que estações distantes geograficamente possam se comunicar, independente da existência de uma rede terrestre. A Figura 4.2 ilustra este tipo de rede.

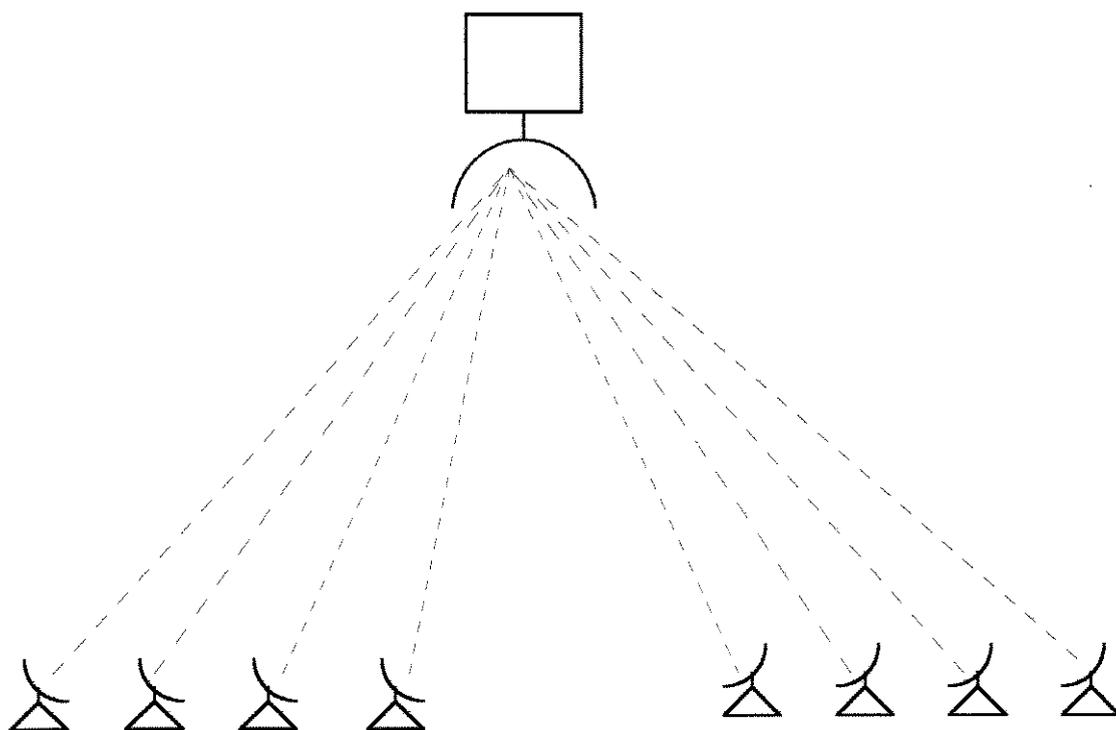


Figura 4.1 - Estrutura típica de uma rede de comunicação por satélite com órbita GEO.

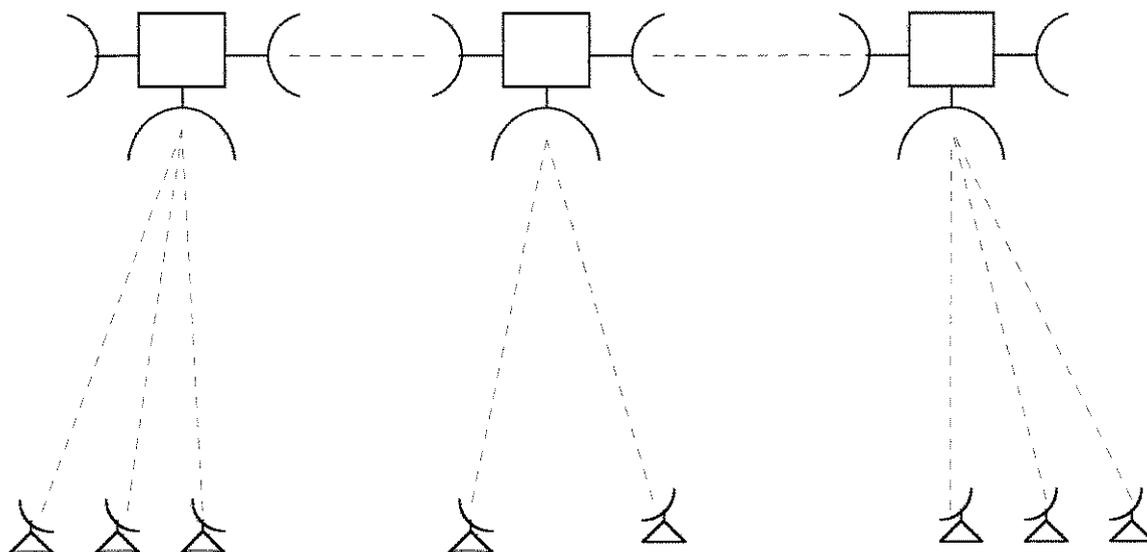


Figura 4.2 - Rede com enlaces entre satélites.

A escolha da técnica de múltiplo acesso é uma questão fundamental para a otimização dos recursos de comunicação em redes via satélite, e é analisada neste capítulo sob o enfoque das redes VSAT e das redes de comunicações móveis por satélite.

1. MÚLTIPLO ACESSO EM REDES VSAT

As redes de comunicação por satélite do tipo VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) se caracterizam pela utilização de uma ou mais estações HUB e um grande número de estações VSAT, que são estações de baixo custo com antenas de pequeno diâmetro (tipicamente entre 0.9 e 2.4 metros). As topologias básicas de implementação da rede são a topologia em malha e a topologia em estrela. Aborda-se aqui apenas a topologia em estrela, por ser a mais usual. Nesta topologia toda comunicação passa pela HUB (que é uma estação de grande porte, com antenas tipicamente entre 4 e 11 metros), não havendo comunicação direta entre duas estações VSAT. A Figura 4.3 ilustra uma rede VSAT com topologia em estrela.

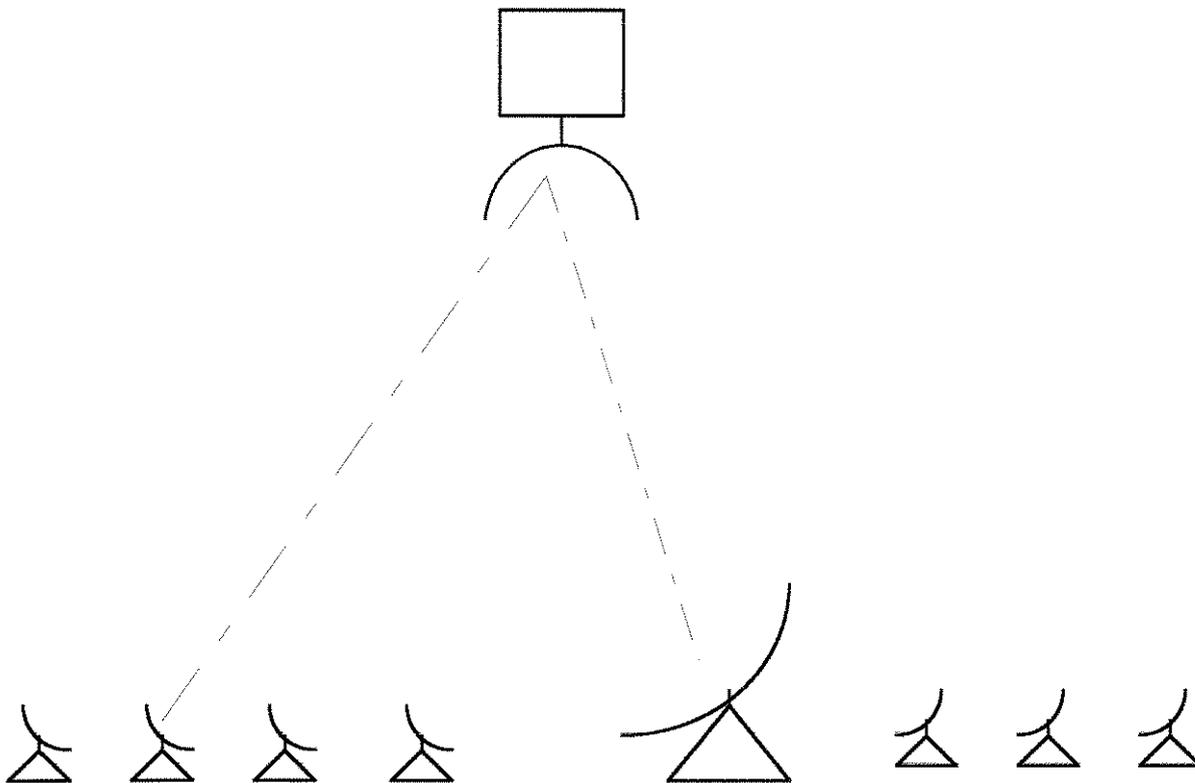


Figura 4.3 - Rede VSAT com topologia em estrela.

Estas redes cresceram significativamente nos últimos anos. No final da década de 80 este crescimento chegava a ultrapassar 50% ao ano, de 1992 a 1997 o número de terminais VSAT cresceu em média cerca de 20% ao ano [Comsys98]. Esta tecnologia vem sendo utilizada para a implantação das redes de comunicação de dados de grandes corporações, como por exemplo: empresas do setor financeiro, redes de concessionárias de automóveis, companhias aéreas, redes de hotéis, cadeias de lojas, redes para loterias eletrônicas instantâneas, etc. Nestas aplicações o perfil de tráfego é interativo (requisição-resposta), os terminais remotos (conectados às estações VSAT) se comunicam com um computador central (*host*) que está diretamente conectado à estação HUB. O tráfego é em rajadas, com um grande número de estações geograficamente dispersas.

A taxa de transmissão no canal *outbound* (HUB-VSAT) é, tipicamente, entre 56 kbps e 2 Mbps, enquanto no canal *inbound* (VSAT-HUB), devido a limitação de potência nas VSATs, está entre 32 e 128 kbps.

A principal figura de mérito para o projeto de uma rede com tráfego interativo é o tempo de resposta, que é definido como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro bit da mensagem de requisição é transmitido e o instante em que a mensagem de resposta começa a ser visualizada pelo usuário (que muitas vezes coincide com o instante em que o último bit da mensagem de resposta é recebido). Para a maior parte das aplicações onde existe a presença do usuário, o tempo de resposta máximo tolerável, na hora de pico, deve ser de 5 segundos.

As transmissões da HUB para as estações VSAT são feitas, tipicamente, empregando-se multiplexagem por divisão de tempo (TDM), onde a HUB transmite um quadro TDM simultaneamente para todas as estações. Este quadro é composto de um padrão utilizado para sincronismo das estações remotas, e por diversas mensagens de comprimento variável, cada uma contendo um campo de endereço que identifica para qual estação aquela mensagem se destina, conforme ilustrado pela Figura 4.4 [Chakraborty88].

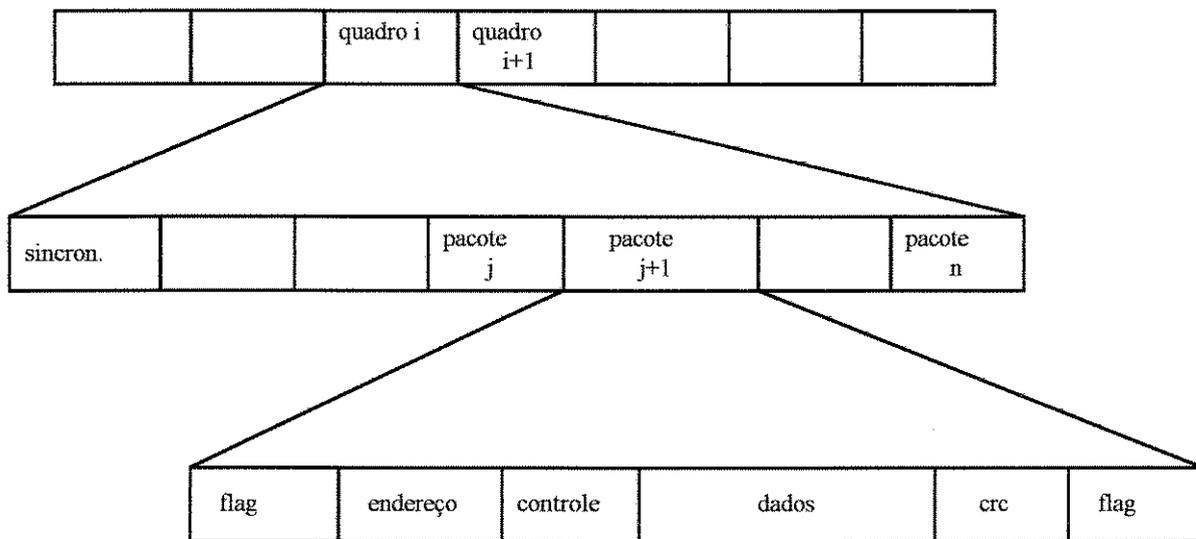


Figura 4.4 - Formato típico do quadro TDM para transmissão da HUB para as VSATs.

No sentido VSAT para HUB, face ao perfil de tráfego da rede e ao número de estações existentes, torna-se essencial a utilização de um protocolo de múltiplo acesso que faça uso eficiente da largura de faixa do satélite, que se relaciona diretamente ao custo de comunicação, e que resulte em um atraso de transferência de pacote compatível com o tempo de resposta desejado para o sistema. A necessidade de compartilhamento eficiente do canal deve ser balanceada com o custo de implementação das estações remotas (VSATs). Alguns aspectos importantes na escolha do protocolo de múltiplo acesso para o cenário VSAT são:

- A eficiência do compartilhamento do canal;

- As características de atraso, em termos médio e de pico;
- O custo e a complexidade de implementação.

A escolha do protocolo deve levar em conta também as características específicas do sistema satélite, que pode apresentar limitação de potência, permitindo que se utilize um protocolo de acesso de menor eficiência sem que isto afete significativamente a capacidade do sistema [Raychaudhuri88]. Por exemplo, a máxima vazão de $1/2e$ para a técnica *Aloha* representa um limite superior para a fração do tempo que o canal compartilhado pode ser usado de forma efetiva pelas estações, mas não diz nada a respeito da taxa na qual os dados são realmente transmitidos no canal. A capacidade do canal, que descreve a taxa em que os dados podem ser transmitidos com taxa controlada de erro no canal, é uma figura de mérito mais adequada para se comparar as técnicas de acesso em canais com limitação de potência média e transmissão em rajadas, como é o caso do sistema VSAT [Abramson92]. Para ilustrar esta questão analisa-se a seguir a capacidade de um canal utilizando múltiplo acesso *Aloha*.

1.1. CAPACIDADE DE CANAL COM MÚLTIPLO ACESSO ALOHA

A capacidade de um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) com largura de faixa W , e relação sinal/ruído P/N é dada pelo Teorema de Shannon [Shannon48]:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (4.1)$$

Se a transmissão no canal ocorre em rajadas e a técnica de acesso é *Aloha*, a capacidade do canal é reduzida pelo fator S , que é a vazão no canal, mas, para a mesma potência média P , a potência recebida durante a transmissão das rajadas poderá ser P/G , conforme ilustrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Relação entre potência média e potência de pico no canal *Aloha*.

A capacidade do canal torna-se [Abramson94]:

$$C = G e^{-2G} W \log_2 \left(1 + \frac{P}{GN} \right) \quad (4.2)$$

Definindo-se agora a eficiência do canal *Aloha* como a relação entre (4.1) e (4.2), tem-se:

$$\eta = \frac{Ge^{-2G} \log\left(1 + \frac{P}{GN}\right)}{\log\left(1 + \frac{P}{N}\right)} \quad (4.3)$$

A Figura 4.6 mostra a capacidade do canal *Aloha*, normalizada em relação a largura de faixa, em função da carga total na rede, enquanto a Figura 4.7 mostra a eficiência do canal em função de G .

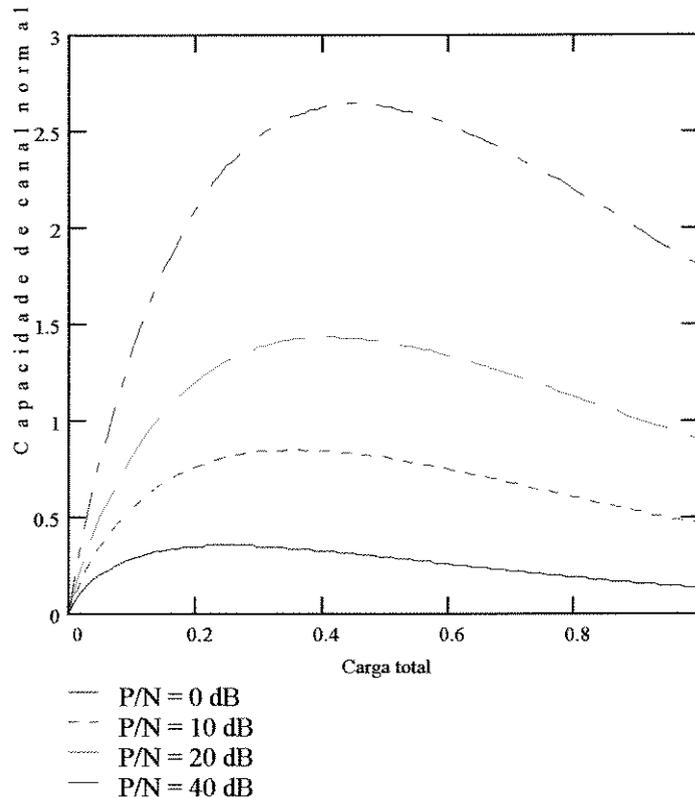


Figura 4.6 - Capacidade do canal *Aloha* normalizada em relação a largura de faixa.

A potência no *downlink* de um sistema de comunicação por satélite é limitada, resultando em uma limitação no valor de P/N do sistema. Para valores exequíveis para uma rede VSAT, a capacidade do canal normalizada é inferior a 2 bps/Hz.

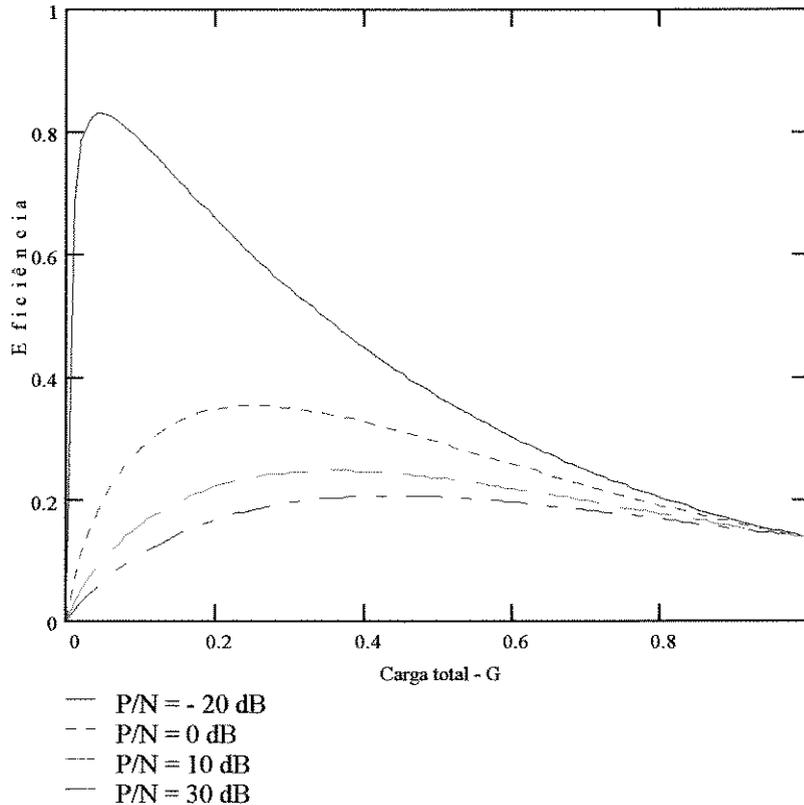


Figura 4.7 - Eficiência do canal Aloha.

Da Figura 4.7 e da expressão (4.3) observa-se que a medida que P/N cresce, a eficiência tende para a máxima vazão no canal (0.184), e que para valores de P/N muito pequenos a eficiência tende a 1. Para uma situação realista, por exemplo para $P/N = 10$ dB, a eficiência máxima ocorre para $G \approx 0.36$ e vale 0.246, ultrapassando a vazão máxima de 0.184.

1.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DO PROTOCOLO DE ACESSO

As técnicas de múltiplo acesso com alocação fixa são adequadas para redes compostas de um pequeno número de estações (por exemplo, $M \leq 10$), onde cada estação apresenta um padrão de tráfego estável e previsível. Dentre as três técnicas desta classe, a TDMA se destaca pelo menor atraso de transferência de pacote, pelo fato de ter apenas uma portadora presente no *transponder* a um dado instante, o que permite a operação do *transponder* mais perto da saturação, melhorando a relação E_b/N_0 do sistema, e pela maior flexibilidade para acomodar reconfigurações na rede.

Para redes VSAT com um grande número de terminais de baixo tráfego com característica de transmissão em rajadas, as técnicas de alocação fixa não são adequadas, pois resultariam em má utilização da largura de faixa do canal e em atrasos médios significativos. Por exemplo, para uma rede composta de 1.000 estações VSAT gerando pacotes com um compri-

mento de 1024 bits, transmitindo a 64 kbps utilizando o múltiplo acesso TDMA, o atraso médio de transferência de pacote teria um valor mínimo de 8 s, independentemente da carga na rede, o que é incompatível com os requisitos de tempo de resposta do sistema.

Em uma rede usando *polling*, em situação de baixo tráfego o atraso médio de transferência de pacote pode ser calculado pela soma do tempo de transmissão do pacote mais metade do tempo total de *polling* de todas as estações. O tempo mínimo requerido para efetuar o *polling* com uma estação VSAT, desprezando-se o tempo de transmissão da mensagem de *polling* e o tempo de transmissão da resposta ao *polling*, é duas vezes o tempo de propagação, da ordem de 0.5 s. Em uma rede com 1000 estações, o tempo mínimo necessário para efetuar o *polling* com todas estações é 500 s, estabelecendo um limite inferior para o atraso médio de transferência de pacote de 250 segundos, tornando este tipo de acesso inviável para a aplicação em questão. Os protocolos de passagem de ficha também esbarram na característica do elevado tempo de propagação, agravado pelo fato de não haver comunicação direta entre duas estações VSAT.

As técnicas de acesso da família CSMA tem desempenho inversamente proporcional ao tempo de propagação na rede. Nas redes VSAT o tempo de propagação é da ordem de 250 ms, normalmente muito maior que o tempo de transmissão de um pacote, tornando estes protocolos inadequados.

As estações VSAT não podem “ouvir” suas próprias transmissões de forma confiável, acarretando a necessidade de haver uma mensagem de reconhecimento positivo para caracterizar o recebimento da mensagem sem colisão. Isto implica em um atraso mínimo de 0.5 s para que uma estação VSAT perceba que um pacote sofreu colisão e inicie o processo de retransmissão, após um atraso aleatório. Esta característica tem um efeito negativo na máxima vazão admissível para a rede. Por exemplo, na condição de máxima vazão para a rede *Aloha* ($S = 0.184$ e $G = 0.5$), o número médio de vezes que um pacote tem de ser transmitido para chegar com sucesso ao destino é 2.7, podendo conduzir a um tempo de resposta médio inaceitável. Para satisfazer este critério torna-se muitas vezes necessário reduzir a vazão da rede de modo a se obter uma operação sem (virtualmente) colisão. Por exemplo, reduzindo-se a vazão máxima de um fator de 2.7, obtém-se $S = 0.068$, $G = 0.0798$, e um número de transmissões por pacote recebido com sucesso de 1.17.

A técnica de acesso *Aloha* apresenta então como desvantagem a baixa vazão no canal, e como vantagens a baixa complexidade e o fato de não haver nenhum atraso adicional entre o instante em que a estação tem um pacote para transmitir e o instante em que ela inicia a transmissão. Esta última característica faz com que este tipo de rede apresente o menor tempo de resposta na situação de operação livre de colisão (baixo tráfego).

O uso do *Slotted Aloha* leva a um incremento na máxima vazão para 0.368 ao custo do aumento de complexidade para se obter um sistema com janelas globalmente síncrono. A máxima vazão realizável é menor do que o valor teórico de 0.368, devido aos requisitos de tempo de guarda e ao *overhead* introduzido no processo de conversão do comprimento dos pacotes para um formato com pacotes fixos. Se os pacotes trafegando no sistema forem

muito curtos, estes efeitos podem levar a um resultado final muito próximo do obtido com a rede *Aloha*. Na operação livre de colisão o atraso pela espera do início da janela resulta em um tempo de resposta maior do que o obtido na rede *Aloha*.

Em sistemas que utilizam a técnica *Aloha*, a maior parte das colisões entre pacotes é parcial, mas levam à retransmissão do pacote. Uma forma de aumentar o desempenho do sistema é utilizar o protocolo denominado *Selective-Reject Aloha (SREJ-Aloha)*. Nesta técnica os pacotes são divididos em subpacotes, cada um contendo seu próprio cabeçalho e *trailer*. Quando ocorrer uma colisão, apenas alguns subpacotes serão afetados, e conseqüentemente retransmitidos.

A técnica *SREJ-Aloha* permite uma vazão próxima do *Slotted Aloha* sem o ônus do sincronismo entre as estações. A máxima vazão teórica se aproxima de 0.368, independente da distribuição do comprimento do pacote. A necessidade de preâmbulo de aquisição e cabeçalho em cada subpacote limita a máxima vazão útil na faixa de 0.2 a 0.3. A necessidade de se ter baixos *overheads* associados aos subpacotes, impõe alguns limites de *hardware* no sistema. Especificamente, faz-se necessário o uso de *modems* que admitam preâmbulos de aquisição curtos [Raychaudhuri87] [Raychaudhuri88].

As técnicas de acesso híbridas do tipo DAMA (*Demand Assigned Multiple Access*) empregam uma fração do tempo do canal para a transmissão de pacotes de reserva, usando TDMA ou um protocolo com contenção (*Aloha ou Slotted Aloha*). Uma vez efetuada a reserva, a transmissão do pacote se dá sem colisão. O processamento dos pacotes de reserva e a alocação das janelas de transmissão podem ser centralizadas em uma estação ou distribuídas entre todas as estações.

Técnicas DAMA que usam TDMA para a reserva só podem ser utilizadas em redes onde o número de estações VSAT não é muito grande, uma vez que o *overhead* introduzido pelo processo de reserva aumenta com o número de estações. Se a técnica *Slotted Aloha* é utilizada no processo de reserva, a dependência do número de estações é essencialmente eliminada, mas o protocolo não pode mais ser considerado livre de colisões, estando sujeito às mesmas instabilidades dos protocolos com contenção.

A definição do quadro no protocolo DAMA deve considerar que as estações só recebem os pacotes de reserva após o tempo de propagação na rede. Duas possíveis formas de divisão do quadro são ilustradas na Figura 4.8.

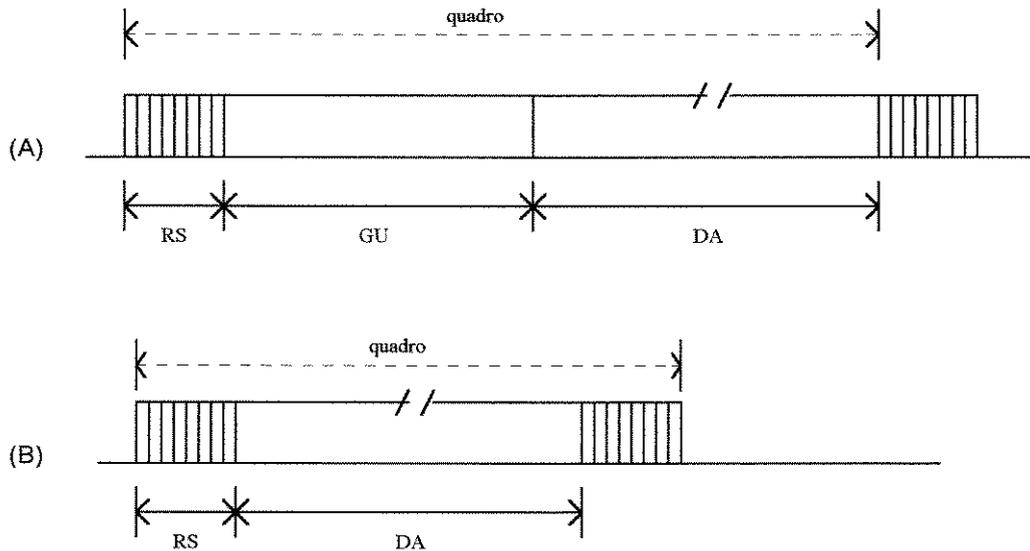


Figura 4.8 - Formato típico do quadro nos protocolos DAMA.

Na estrutura da parte (A) da Figura 4.8 o sub-quadro GU, entre o sub-quadro de reserva RS e o sub-quadro de transmissão de dados com reserva DA, tem duração suficiente para garantir que as estações recebam os pacotes de reserva antes do início das janelas de transmissão no sub-quadro DA, ou seja, o sub-quadro GU tem duração maior do que o tempo de propagação na rede. No protocolo proposto por Balagangadhar e Pickholtz, em [Balagangadhar79], o sub-quadro GU é dividido em M janelas que são alocadas de forma fixa às estações da rede para transmissão de dados, todas as janelas do quadro são compartilhadas segundo a técnica TDMA, sendo o número de janelas RS e GU iguais ao número de estações na rede e o número de janelas DR igual ao número de reservas efetuadas nas janelas RS do quadro. No protocolo PDAMA modificado (*Modified Packet Demand Assignment Multiple Access*) proposto por Kwak e Lim para um sistema de comunicações móveis com satélite geoestacionário, parte do sub-quadro GU é utilizada para transmissão utilizando o protocolo *Aloha* e parte é utilizada para acomodar diferenças no tempo de propagação das diversas estações móveis, enquanto os sub-quadros RS e DA utilizam os protocolos *Slotted-Aloha* e TDMA, respectivamente [Kwak95].

Na estrutura da parte (B) o sub-quadro GU é eliminado, e o quadro é dividido nos sub-quadros RS e DA. A duração do quadro deve ser maior que o tempo de propagação na rede. Estações com pacotes para transmitir efetuam suas reservas em um quadro e transmitem os pacotes no quadro seguinte. No protocolo PODA (*Priority-Oriented Demand Assignment*), o protocolo de acesso para o sub-quadro RS pode ser o *Slotted-Aloha* ou o TDMA; o sub-quadro DA, compartilhado através de TDMA, é dividido em duas partes, uma dedicada a transmissão de fluxos contínuos de informação (como voz, por exemplo), cuja reserva é feita a cada chamada, e outra dedicada a transmissão de rajadas (como dados, por exemplo), cuja reserva é feita a cada datagrama [Tobagi84].

Vários outros protocolos DAMA tem sido propostos, como por exemplo: BRAM (*Broadcast Recognition Access Method*), BRAP (*Broadcast Recognition with Alternating Priori-*

ties), MLMA (*Multi-Level Multi-Access Protocol*), GSMA (*Global Scheduling Multiple Access*), FPODA (*Fixed Priority Oriented Demand Assignment*), *Reservation-Aloha*, *FIFO Reservation*, RR (*Round-Robin Reservation*), IFFO (*Interleaved Frame Flush-Out*), RUC (*Reservation Upon Collision*), SRUC (*Split-Channel Reservation Upon Collision*), ARRA (*Announced Retransmission Random Access*), SRMA (*Scheduled-Retransmission Multiple Access*), PDAMA (*Packet-Demand Assignment Multiple Access*) [Peyravi96].

As técnicas DAMA resultam em uma vazão máxima maior do que a obtida nos protocolos com contenção, desde que o comprimento dos pacotes seja substancialmente maior que o tamanho mínimo dos pacotes de reserva. Por outro lado, estas técnicas apresentam um atraso de transferência de pacote mínimo igual a duas vezes o tempo de propagação da rede (cerca de 0.5 segundo), mesmo que o tráfego seja muito baixo, e uma maior complexidade de implementação.

2. SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

Os sistemas de comunicações móveis tem tido um crescimento exponencial nesta década. Com a disseminação deste tipo de serviço, novas características e facilidades começam a ser desejadas por seus usuários, como por exemplo: possibilidade de falar de qualquer lugar (cobertura total), possibilidade de utilizar um único aparelho e número em qualquer lugar do mundo, possibilidade de realizar outros tipos de comunicação além de voz, como transmissão de dados e fax. Os sistemas de comunicações móveis celulares atuais não conseguem atender estas novas características, deixando espaço para o surgimento de novas redes de comunicação, tais como as redes de comunicação por satélite.

Novos sistemas de comunicações móveis por satélite têm sido propostos. A Tabela 4.1 resume algumas características de alguns sistemas denominados Big-LEO (*Big- Low Earth Orbit*), que são sistemas de baixa órbita (com exceção do Odyssey que é um sistema MEO), onde os satélites possuem potência e largura de faixa suficientes para prover serviços de voz com qualidade para terminais portáteis ou veiculares e também para prover outros serviços, tais como transmissão de dados a baixa velocidade (2400 baud no Iridium), fax (2400 baud no Iridium), *paging* e localização de posição (RDSS - *Radio Determination Satellite Services*). A faixa de frequência alocada para estes sistemas é de 1616 a 1626.5 KHz para o *uplink* e 2483.5 a 2500 KHz para o *downlink* (com exceção do Iridium que utiliza a mesma faixa do *uplink* no *downlink*) [Miller98] [Wu94].

Sistema	Satélites	Planos de Órbita	Altitude [km]	Múltiplo Acesso
Iridium	66	6 - Polar	780	TDMA
Globalstar	48	8 - Inclínada	1414	CDMA
Odyssey	12	3 - Inclínada	10400	CDMA
Aries	48	4 - Polar	1020	CDMA

Tabela 4.1 - Algumas característ. de alguns sistemas de comunicações móveis por satélite.

O movimento relativo entre o satélite e a Terra resulta na ocorrência de *hand-off* (entre satélites) mesmo que a estação móvel esteja parada. Se a lei de iluminação do satélite (*footprint*) for dividida em células, conforme ilustrado na Figura 4.9, surge também a necessidade de *hand-off* entre células de um mesmo satélite.

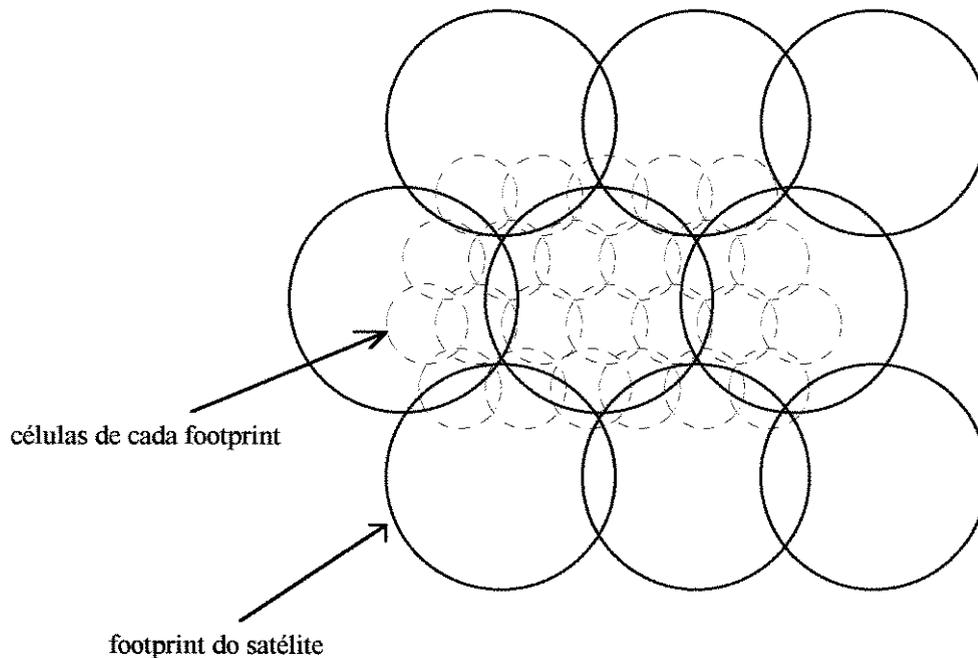


Figura 4.9 - *Footprint* dos satélites e suas células.

2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DO PROTOCOLO DE ACESSO

As técnicas TDMA e CDMA são as duas principais técnicas utilizadas em sistemas de comunicações móveis por satélite, e são analisadas nesta seção quanto ao número máximo de usuários suportados no sistema.

Para a análise do desempenho das técnicas de múltiplo acesso admite-se: o canal tem largura de faixa W , a técnica de modulação possui eficiência de largura de faixa α , utiliza-se correção automática de erros (*Forward Error Correction* - FEC) através de um código com taxa r , o diagrama de irradiação de cada satélite é dividido em células, e o fator de reuso de frequências é K .

Para o TDMA, o número máximo de estações é:

$$M = r \cdot \frac{W \cdot \alpha}{R} \cdot \frac{1}{K} \quad (4.4)$$

No CDMA o número máximo de estações em um sistema com uma única célula, considerando $M \gg 1$ e desprezando-se o ruído térmico no canal, é dado por:

$$M = \frac{W/R \cdot r}{E_b/N_o} \quad (4.5)$$

O valor determinado pela expressão (4.5) deve ser corrigido de modo a considerar as características específicas dos sistemas de comunicações móveis por satélite.

Análises efetuadas em [Monsen95] indicam que a capacidade do *uplink* tende a ser menor do que a capacidade do *downlink*, prevalecendo portanto para o cálculo da capacidade do sistema. Os fatores adicionais considerados para a avaliação da capacidade do sistema são:

FATOR DE ATIVIDADE DE VOZ (v): O valor do fator de atividade de voz pode ser determinado por:

$$v = f_v \cdot [v_a + (1 - v_a)r_f] + (1 - f_v) \quad (4.6)$$

Considerando-se $f_v = 0.8$, $v_a = 0.35$ e $r_f = 0.25$, tem-se $v = 0.6$. Se o número de usuários de voz em conversação (N) não é muito elevado, a probabilidade de se ter um número médio de usuários ativos maior do que Nv_a não é desprezível. Nestas condições, o fator de atividade de voz é superior àquele calculado por (4.6).

MARGEM DE DESVANECIMENTO (ϵ): O tempo de propagação nos sistemas de baixa órbita pode chegar a dezenas de ms. O comportamento do enlace satélite inclui desvanecimentos lentos, que podem ser compensados através de um processo de controle de potência adaptativo, e desvanecimentos rápidos, com duração inferior a 10 ms, que são de difícil compensação. Devido a esta característica torna-se necessário estabelecer uma margem de desvanecimento para o sistema, que implica no aumento do nível de potência transmitida pela estação móvel e pelo satélite e, conseqüentemente, no potencial aumento do nível de interferência no sistema. A margem necessária pode variar entre 4 e 7 dB se o sistema opera sem diversidade, com significativo decremento na capacidade, uma vez que esta é limitada pela interferência existente. Se o sistema é implementado de modo que a estação móvel possa sempre “enxergar” dois satélites simultaneamente, pode-se utilizar recepção em diversidade, reduzindo-se a margem para algo em torno de 1 dB.

SOBREPOSIÇÃO DE FEIXES (ϕ): A sobreposição do diagrama de irradiação das antenas do satélite faz com que as comunicações de uma célula interfiram em outras células, aumentando o nível de interferência no sistema. O valor proposto por Monsen para um sistema CDMA assíncrono (*up-link*) é de 1.566 ou 1.9 dB.

COMPENSAÇÃO DE ALCANCE (θ): A relação (g) entre ganho de antena e atenuação no espaço livre não é constante ao longo da célula. As estações localizadas em regiões com

menor valor de g devem aumentar a potência de transmissão de modo a obter a mesma qualidade que àquelas localizadas em regiões com maior valor de g . Quando tem-se um único sistema operando, esta característica não afeta a capacidade, uma vez que o aumento da potência é compensado pelo menor valor de g . No entanto, se dois ou mais sistemas CDMA estão operando simultaneamente, o nível de interferência pode aumentar em cada sistema. Mosen adota um modelo simples para estimar o valor deste parâmetro em 1.8 dB.

Estes fatores podem ser agrupados em uma constante única,

$$\eta = \nu \cdot \varepsilon \cdot \phi \cdot \theta \quad (4.7)$$

alterando a capacidade do sistema para

$$M = \frac{W/R \cdot r}{E_b/N_o} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (4.8)$$

Para a situação onde j sistemas CDMA idênticos operam simultaneamente, a capacidade individual de cada sistema se reduz por um fator $1/j$, devido ao aumento do nível de interferência em cada sistema. A expressão (4.8) é reescrita como:

$$M_j = \frac{1}{j} \cdot \frac{W/R \cdot r}{E_b/N_o} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (4.9)$$

A capacidade calculada pela expressão (4.9) deve ser vista como um valor assintótico, uma vez que ela admite que a relação sinal/ruído térmico (C/N) no canal é infinita. Considerando-se o efeito do ruído térmico tem-se:

$$M_j = \frac{1}{j} \cdot \left(\frac{W/R \cdot r}{E_b/N_o} - \left(\frac{C}{N} \right)^{-1} \right) \cdot \frac{1}{\eta} \quad (4.10)$$

Considerando-se $\alpha = 2$, $\eta = 1.18$, ruído térmico desprezível no canal, e um fator de reuso $K = 7$ para o sistema TDMA, tem-se $M_{tdma} > M_{cdma}$ para $(E_b/N_0) > 4.72$ dB. Se o sistema opera com célula única, a capacidade do TDMA é superior se $(E_b/N_0) > -3.73$ dB.

3. CONCLUSÃO

Analisou-se neste capítulo a escolha do protocolo de acesso nas redes VSAT e redes de comunicações móveis por satélite. Mostrou-se que nas redes VSAT os protocolos mais adequados são os da classe Aloha e os protocolos híbridos do tipo DAMA. Nas redes de comunicações móveis analisou-se o desempenho dos protocolos TDMA e CDMA. Mostrou-se que a relação de capacidade entre as duas técnicas depende de diversas características do sistema, impossibilitando uma conclusão definitiva sobre o protocolo mais adequado para os sistemas móveis por satélite.

CAPÍTULO V - REDES DE ALTA VELOCIDADE

A disseminação da microinformática deu origem as redes locais de computadores (LAN - *Local Area Network*), presentes hoje em quase todas as empresas. A evolução dos aplicativos utilizados nestas redes e a busca de interfaces homem-máquina amigáveis demandam constantemente maiores taxas de transmissão. A necessidade de interligar as redes locais, juntamente com o surgimento de novos serviços de telecomunicações com características multimídia (como por exemplo *video-on-demand*, teleeducação, telemedicina, telecompras, etc.), demanda maiores taxas de transmissão também nas redes metropolitanas (MAN - *Metropolitan Area Network*) e nas redes de grande área (WAN - *Wide Area Network*).

A aplicação das técnicas de múltiplo acesso nas redes de alta velocidade locais e metropolitanas é abordada neste capítulo. Utiliza-se a definição feita por Limb em [Limb84]: Rede de alta velocidade é aquela em que o tempo de transmissão do pacote é menor do que o tempo de propagação total (ida e volta) na rede.

De início analisa-se as limitações de alguns protocolos para utilização nas redes de alta velocidade. A seguir, os protocolos utilizados nas redes *FDDI (Fiber Distributed Data Interface)* e *DQDB (Distributed Queue Dual Bus)* são descritos e analisados. Finalmente, analisa-se a escolha do protocolo de múltiplo acesso para uma importante classe de redes de alta velocidade denominada de *All-Optical Networks*.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As aplicações usuais para as redes locais e metropolitanas têm um perfil de tráfego em rajadas; as estações transmitem a taxas elevadas em um percentual pequeno do tempo. Esta característica torna a utilização dos protocolos com alocação fixa ineficiente. Assim, as duas classes de protocolos de acesso consideradas são as que utilizam técnicas aleatórias e com alocação dinâmica.

O protocolo de acesso aleatório tradicionalmente utilizado nas redes locais de computadores é o CSMA-CD. A vazão máxima para este protocolo é inversamente proporcional ao tempo de propagação na rede, normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote a . Considerando pacotes de tamanho constante, utilizando-se a expressão (2.37), pode-se determinar a máxima vazão na rede em função do valor de a , como mostrado na Figura 5.1.

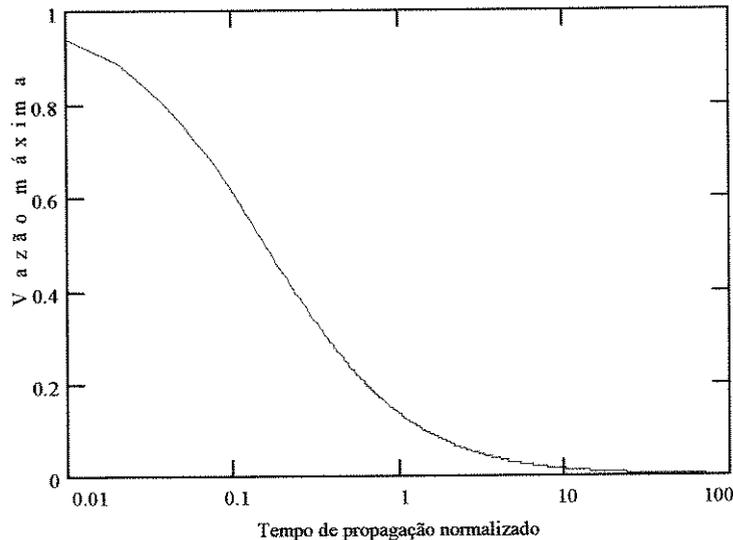


Figura 5.1 - Vazão máxima em função do tempo de propagação normalizado em relação ao tempo de transmissão de um pacote.

A técnica CSMA-CD, bem como as demais técnicas aleatórias tradicionais (*Aloha*, *Slotted-Aloha* e CSMA), se mostram inadequadas para uso nas redes de alta velocidade, devido ao baixo valor da máxima vazão.

As técnicas com alocação por demanda possuem características adequadas ao perfil de tráfego das redes locais e metropolitanas. A técnica de passagem de ficha com múltiplas fichas utilizada na rede *FDDI*, e a técnica de fila distribuída, utilizada na rede *DQDB*, merecem destaque.

2. FIBER DISTRIBUTED DATA INTERFACE (FDDI)

A FDDI é uma rede com aplicação em ambiente local (LAN) e Metropolitano (MAN), baseada no método de acesso de passagem de ficha com múltiplas fichas. A rede utiliza uma topologia com duplo anel, um principal e um de reserva, que é utilizado em caso de defeito no anel principal.

A versão inicial da FDDI especifica a utilização de fibra óptica com diodos emissores de luz (LEDs) operando na janela de 1325 nm sobre uma fibra monomodo. A taxa de transmissão dos dados é de 100 Mb/s, o que resulta em uma taxa no meio de 125 Mbaud, devido a utilização da codificação 4B/5B. O número máximo de octetos por pacote é 4500. Contudo, múltiplos pacotes podem ser transmitidos em uma mesma oportunidade de acesso.

Um número máximo de 1000 conexões físicas e um comprimento máximo de 200 km de fibra são especificados. Visando obter confiabilidade, requisitos de reconfiguração resultam nos limites de 500 estações (uma estação corresponde a duas conexões físicas) interligadas por 100 km de cabo duplo.

A sub-camada MAC (*Medium Access Control*) da FDDI utiliza o protocolo *Timed Token Rotation* (TTR) para controlar o acesso ao meio. Este protocolo se baseia nos contadores denominados *Token Holding Timer* (THT) e *Token Rotation Timer* (TRT) e no parâmetro *Target Token Rotation Timer* (TTRT), que é negociado entre as estações nos procedimentos de inicialização. O valor de TTRT é igual ao menor valor proposto por cada uma das estações.

Toda vez que recebe uma ficha, as estações verificam o valor de TRT, que é igual ao tempo transcorrido desde a última recepção de uma ficha. Se o tráfego gerado pelas estações é baixo, o valor de TRT será pequeno, se o tráfego aumenta este valor cresce. Assim, TRT pode ser visto como uma medida indireta da carga no anel.

Para permitir a transmissão de tráfegos com perfis diferentes, o protocolo estabelece dois tipos de serviço: síncrono e assíncrono. A cada estação é alocada uma parcela da capacidade da rede (esta parcela pode ser zero), que é utilizada para transmissão de serviço síncrono. O parâmetro SA_i indica o tempo alocado para a i -ésima estação transmitir tráfego síncrono.

Quando uma estação que deseja transmitir recebe uma ficha ela calcula a diferença entre TTRT e TRT, que é denominada de tempo de manutenção da ficha (THT). A ação da estação depende do valor de THT: Se THT é positivo a estação pode transmitir seu tráfego síncrono por um período máximo igual a SA_i e seu tráfego assíncrono por um período igual a THT; se o valor de THT é negativo a estação só poderá transmitir seu tráfego síncrono, por um período de tempo máximo igual a SA_i .

A utilização do protocolo TTR permite que as estações requeiram e estabeleçam largura de faixa e tempo de resposta garantidos para quadros síncronos, além de estabelecer um tempo de resposta mínimo garantido para o anel, uma vez que, no pior caso, o tempo entre a chegada de duas fichas sucessivas nunca excederá duas vezes o valor de TTRT.

A máxima vazão para a rede FDDI é dada por [Ghani91]:

$$\rho_{max} = \frac{M(TTRT - \chi)}{M(TTRT - \chi) + (M + 1)\chi + T_t} \quad (5.1)$$

onde χ é a latência do anel, T_t é o tempo para transmitir a ficha, e M é o número de estações no anel. Em geral TTRT é muito maior que T_t , e a máxima vazão pode ser aproximada para:

$$\rho_{max} \cong \frac{M(TTRT - \chi)}{M \cdot TTRT + \chi} \quad (5.2)$$

A máxima utilização de uma rede com k estações ativas ($k = 1, 2, \dots, M$) é dada por [Albert94]:

$$\rho_{max}(k) = \frac{k(TTRT - \chi)}{k \cdot TTRT + \chi} \quad (5.3)$$

O uso de pequenos valores para TTRT, por exemplo 0.6 ms, resulta em um tempo de resposta máximo pequeno (1.2 ms), que pode ser útil em aplicações onde este parâmetro é crítico (por exemplo, transmissão de voz em pacotes). No entanto, baixos valores de TTRT resultam em pequenos valores para a máxima vazão. Por exemplo, em uma rede com 100 estações, com TTRT = 0.6 ms e latência de 0.25 ms, a máxima vazão é de 0.58. Grandes valores de TTRT podem ser usados para garantir altos valores de utilização do anel. Por exemplo, para TTRT = 50 ms tem-se uma vazão máxima de 0.995.

A estimativa de atraso considerando-se as diferentes classes de prioridade possíveis na rede FDDI permanece um problema não resolvido [Albert94]. Apresenta-se aqui apenas a situação com tráfego assíncrono.

Considerando-se que a carga na rede é suficientemente baixa, de modo que qualquer estação que tenha adquirido a ficha possa transmitir todo o conteúdo do *buffer*, a análise dos atrasos torna-se idêntica àquela feita para o protocolo de passagem de ficha com múltiplas fichas. Ou seja, o tempo médio de espera para transmissão (tempo de acesso) é dado pela expressão

$$E\{T_a\} = \frac{\chi \left(1 - \frac{\rho}{M}\right)}{2(1 - \rho)} + \frac{\rho E(n^2)}{2nR(1 - \rho)} \quad (5.4)$$

Uma análise mais precisa deve considerar a influência do parâmetro TTRT. Existem várias aproximações que permitem avaliar o tempo médio de espera em uma rede FDDI com protocolo *timed token*, considerando-se a influência do TTRT. As expressões (5.5) e (5.6) são dois exemplos apresentados em [Albert94]

$$E\{T_a\} = \frac{\chi \cdot \left(1 - \frac{\rho}{M} - \frac{\chi}{TTRT}\right)}{2 \cdot \left(1 - \rho - \frac{\chi}{TTRT}\right)} + \frac{\rho E(n^2)}{2nR(1 - \rho)} \quad (5.5)$$

$$E\{T_a\} = \frac{\left(1 - \frac{\rho}{M}\right) \left(1 - \frac{\chi}{TTRT}\right) \cdot \chi}{2 \cdot \left(1 - \rho - \left(1 + \frac{\rho}{M}\right) \cdot \frac{\chi}{TTRT}\right)} + \frac{\left(1 + \frac{1}{M}\right) \cdot \frac{\chi \rho n}{R \cdot TTRT}}{1 - \rho - \left(1 + \frac{\rho}{M}\right) \cdot \frac{\chi}{TTRT}} + \frac{\rho E(n^2) \left(1 - \frac{\chi}{TTRT}\right)}{2nR \cdot \left(1 - \rho - \left(1 + \frac{\rho}{M}\right) \cdot \frac{\chi}{TTRT}\right)} \quad (5.6)$$

As Figuras (5.2) e (5.3) mostram o tempo de acesso normalizado em relação ao tempo de transmissão do pacote, considerando-se as expressões (5.4), (5.5) e (5.6), em uma rede FDDI com latência total igual 0.1 ms, taxa de transmissão de 100 Mbps, onde as estações transmitem pacotes cujo comprimento médio é de 500 bytes (com distribuição exponencial). Percebe-se que, para valores de TTRT muito maiores que a latência total do anel os resultados praticamente se confundem, e a expressão (5.4) constitui uma boa aproximação. Para valores menores de TTRT, a expressão (5.4), por desconsiderar este parâmetro, leva a resultados otimistas, devendo-se utilizar as expressões (5.5) ou (5.6).

O desempenho da rede melhora à medida em que a relação entre o TTRT e a latência do anel aumenta.

O tempo médio de transferência do pacote é calculado por:

$$E\{T\} = E\{T_a\} + \frac{n}{R} + \frac{\lambda}{2} \quad (5.7)$$

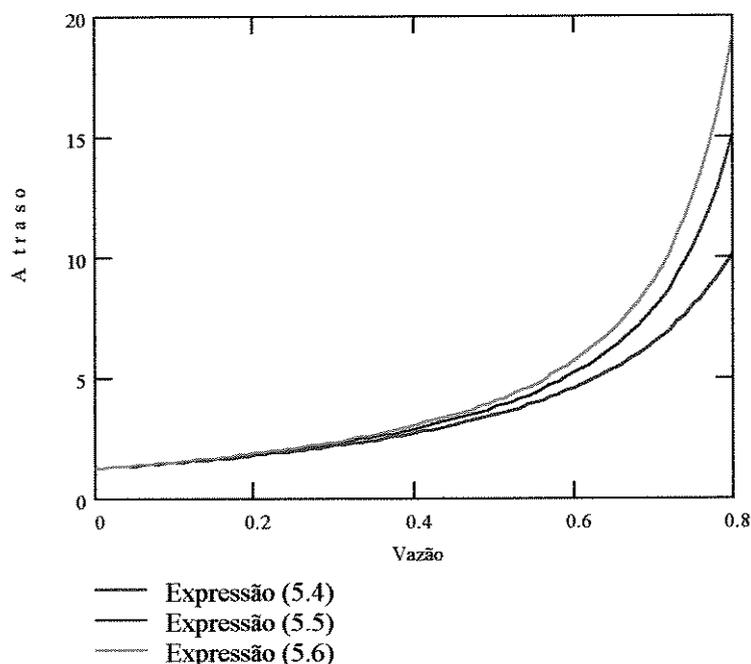


Figura 5.2 – Atraso de acesso em rede FDDI com TTRT = 1 ms

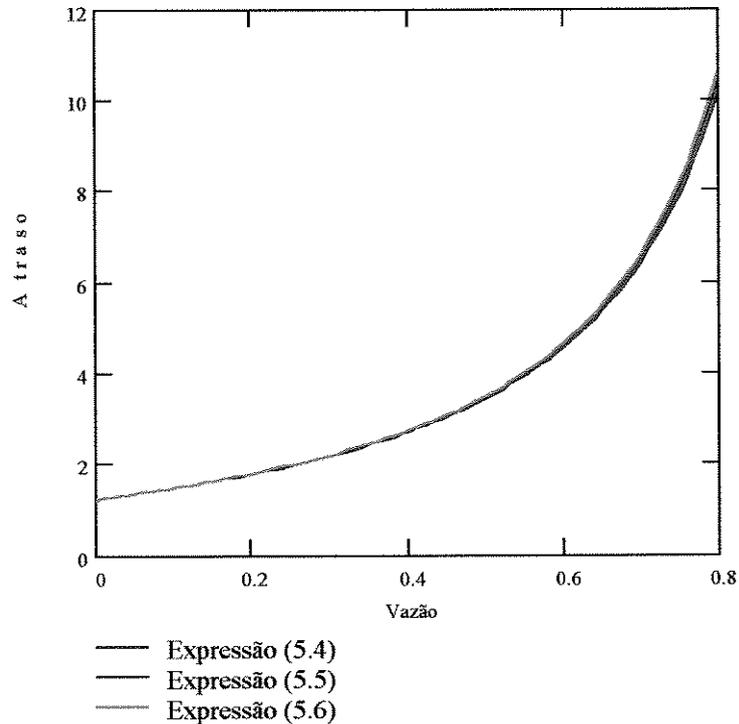


Figura 5.3 - Atraso de acesso em rede FDDI com TTRT = 10 ms

3. DISTRIBUTED QUEUE DUAL BUS (DQDB)

A rede DQDB deriva da rede *QPSX (Queued Packet and Synchronous Switch)* descrita em [Newman88].

O DQDB é o protocolo adotado pelo padrão IEEE 802.6 para redes metropolitanas. Este padrão define três tipos de serviço: serviços orientado a conexão, não-orientado a conexão e isócrono. Para suportar estes serviços, dois métodos de acesso são especificados: acesso com Fila Arbitrada (QA) e acesso Pré-Arbitrado (PA). O acesso QA suporta serviços assíncronos, tais como transmissão de dados orientado e não-orientado a conexão, enquanto o acesso PA suporta serviços isócronos, tais como transmissão de voz e vídeo.

Apenas acesso com Fila Arbitrada é apresentado neste trabalho. Admite-se que todos os pacotes possuem a mesma prioridade e que o mecanismo de balanceamento de largura de faixa, que garante justiça no tratamento das estações em situação de sobrecarga, está desabilitado.

3.1. DESCRIÇÃO BÁSICA DO PROTOCOLO DQDB [Ghani91][Sloan91]

As estações são interconectadas através de dois barramentos unidirecionais, denominados barramento A e barramento B, como mostrado na Figura 5.4. As estações na extremidade dos barramentos são chamadas de *Head of Bus* (HOB).

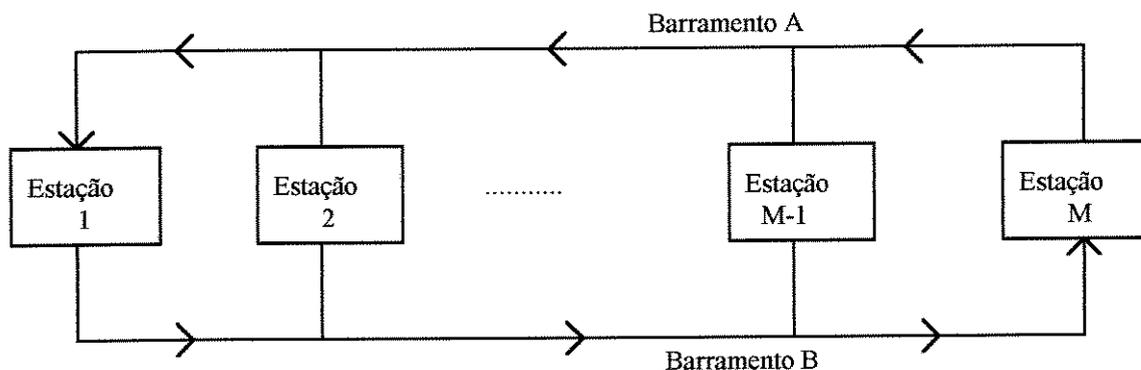


Figura 5.4 - Topologia da rede DQDB.

A estrutura de transporte definida no IEEE 802.6 é similar àquela definida para a célula ATM: antes de serem transmitidas, as mensagens são segmentadas em pacotes de 44 bytes, aos quais são acrescentados 9 bytes de *overhead* para formar um *slot* de 53 bytes. O primeiro byte do *slot* é chamado Campo de Controle de Acesso (*Access Control Field - ACF*), e os restantes 52 bytes constituem o *payload* do *slot*. O ACF contém um bit *Busy* (BSY), que indica se o *slot* está vazio ou ocupado; um bit de tipo de *slot* (*Slot Type*), que indica se o *slot* pode ser ocupado por um pacote do tipo QA ou PA; e três bits de requisição (Request), um para cada tipo de prioridade definida (0, 1 ou 2), que são utilizados pelas estações para fazer reserva de *slots*. As estações HOB são as responsáveis por gerar *slots* vazios, dos tipos QA e PA, a uma taxa constante.

Quando uma estação deseja transmitir deve escolher o barramento por onde irá efetuar sua transmissão em função da localização da estação de destino. Às estações é permitido enfileirar um pacote por vez para cada barramento. Quando uma estação tem um pacote para transmitir pelo barramento A, deve fazer uma reserva de *slot*. Para tal, a estação deve aguardar a passagem de um *slot*, no barramento B, com o bit de requisição vazio, a reserva é feita fazendo-se este bit igual a 1. Assim, para transmissão em um barramento, as estações fazem a reserva de *slots* utilizando o outro barramento. Os barramentos A e B são essencialmente simétricos, por simplicidade de apresentação, admi-se que as transmissões sejam feitas pelo barramento A e as reservas de *slots* pelo barramento B.

Uma Fila Distribuída, comum a todas as estações, é usada para determinar se um pacote (enfileirado em uma dada estação) pode ser transmitido no próximo *slot* vazio. Cada estação mantém o *status* da Fila Distribuída em uma Máquina de Estado de Fila Distribuída (*Distributed Queue State Machine - DQSM*). Tem-se uma DQSM para cada um dos barramentos e para cada uma das três prioridades possíveis. A DQSM pode estar em um de dois estados

possíveis: *Idle State*, quando não há pacote enfileirado na estação; e *Queued State*, quando existe um pacote aguardando transmissão. Cada DQSM mantém dois contadores, denominados contador RQ (*ReQuest*) e contador CD (*CountDown*). Estes contadores são utilizados para determinar a localização dos pacotes enfileirados na fila distribuída, e a forma como eles são interpretados depende do estado em que a DQSM se encontra: se a DQSM está no estado *Idle*, RQ representa o número de pacotes enfileirados em estações anteriores à estação a qual a DQSM pertence (*downstream*); e CD está sempre em zero. Se a DQSM está no estado *Queued*, RQ representa o número de pacotes enfileirados em estações anteriores à estação a qual a DQSM pertence, mas que estão atrás (do pacote enfileirado na estação à qual a DQSM pertence) na fila distribuída; e CD representa o número de pacotes enfileirados em estações anteriores à estação a qual a DQSM pertence, mas que estão na frente na fila distribuída. Assim, em qualquer caso, $RQ + CD$ representa o número total de pacotes enfileirados em estações anteriores àquela a qual a DQSM pertence.

Nas transmissões feitas pelo barramento A, os valores dos contadores são alterados pela passagem de *slots* vazios no barramento A e *slots* com requisições no barramento B.

No estado *Idle*, RQ é incrementado toda vez que um *slot* contendo uma requisição passa pela estação pelo barramento B, e decrementado (até zero) toda vez que um *slot* vazio passa pelo barramento A.

Quando uma estação deseja transmitir um pacote (denominado pacote local) ela passa do estado *Idle* para o estado *Queued*. Duas ações são executadas pela estação neste instante: (1) o valor de RQ é copiado para o contador CD, isto é, no instante em que um pacote é enfileirado, o número total de pacotes que estão enfileirados à *downstream* da estação torna-se o número total de pacotes à *downstream* que estão na frente do pacote local na fila distribuída; (2) o valor de RQ é feito igual a zero, isto é, o número total de pacotes enfileirados à *downstream* da estação e que estão atrás do pacote local na fila distribuída é feito igual a zero.

Uma vez no estado *Queued*, RQ é incrementado toda vez que um *slot* com requisição passa pela estação pelo barramento B, enquanto CD é decrementado a cada *slot* vazio que passa pelo barramento A. Quando o contador CD chega a zero, não há nenhum pacote enfileirado à *downstream* que esteja na frente do pacote local na fila distribuída. Portanto, o primeiro *slot* vazio que passar pela estação será utilizado para transmissão de seu pacote. A DQSM volta então ao estado *Idle*, mantendo-se os valores dos contadores. As estações, uma vez no estado *Queued*, só podem transmitir um pacote, retornando obrigatoriamente ao estado *Idle*.

3.2. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO DQDB

Define-se D_i como sendo o atraso sofrido por uma mensagem na estação (i), isto é, D_i é o tempo decorrido entre o instante em que a mensagem chega a estação e o instante em que a mesma é completamente transmitida pelo barramento. Supondo-se cada estação modelada pela fila M/G/1 tem-se [Ghani91]:

$$E\{D_i\} = \left(\frac{\rho_i E\{T_{a,i}^2\} + (\lambda_i E\{b_i^2\} - \rho_i) E\{T_{a,i}\}}{2(1 - \rho_i E\{T_{a,i}\})} + E\{b_i\} E\{T_{a,i}\} + \frac{1}{2} \right) \cdot \tau \quad (5.8)$$

onde, b_i é o número de pacotes por mensagem para a i-ésima estação; λ_i é o número médio de mensagens/slot chegando na i-ésima estação; $\rho_i = \lambda_i E\{b_i\}$ é a utilização do slot da i-ésima estação e τ é a duração de um slot.

$$E\{T_{a,i}\} = E\{T_1\} + E\{T_2\} \qquad E\{T_{a,i}^2\} = E\{T_1^2\} + E\{T_2^2\} + 2E\{T_1\}E\{T_2\}$$

$$\gamma_i = \sum_{j=i}^{N-1} \rho_j \qquad E\{T_1\} = \frac{\gamma_i E\{T_2^2\}}{2(1 - \gamma_i E\{T_2\})} \qquad E\{T_1^2\} = 2 \left(\frac{\gamma_i E\{T_2^2\}}{2(1 - \gamma_i E\{T_2\})} \right)^2 + \frac{\gamma_i E\{T_2^3\}}{3(1 - \gamma_i E\{T_2\})}$$

$$E\{T_2\} = \frac{1}{1 - q_i} \qquad E\{T_2^2\} = \frac{1 + q_i}{(1 - q_i)^2} \qquad E\{T_2^3\} = \frac{1 + 4q_i + q_i^2}{(1 - q_i)^3}$$

$$q_0 = 0 \qquad q_i = \sum_{j=1}^{i-1} \rho_j$$

O atraso médio de uma mensagem considerando-se todas as estações da rede é:

$$E\{D\} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\lambda_i E\{D_i\}}{\Lambda} \quad (5.9)$$

com,

$$\Lambda = \sum_{i=0}^{N-1} \lambda_i \quad (5.10)$$

$T_{a,i}$ é o atraso de acesso ao slot na i-ésima estação, ou seja, é o período (em slots) entre o instante em que o pacote alcança a cabeça da fila local para cada estação e o instante em que ele é completamente transmitido no barramento. Ele consiste dos períodos T_1 , tempo que o pacote da i-ésima estação leva para alcançar a cabeça da fila distribuída (isto é, quando o

contador CD chega a zero), e T_2 , intervalo entre o instante em que o contador CD chega a zero e a transmissão do pacote é terminada. T_1 e T_2 são assumidos serem independentes e T_2 é suposto ser uma variável aleatória distribuída geometricamente, com parâmetro $1-p_i$.

Admitindo-se que o comprimento das mensagens é exponencialmente distribuído com média $E\{n\}$ bytes, a probabilidade que j pacotes sejam gerados por uma mensagem é igual a $(1-p)^{j-1}p$, com p dado por

$$p = 1 - e^{-44/E(n)}$$

Portanto,

$$E\{b_i\} = \frac{1}{p} \quad E\{b_i^2\} = \frac{2-p}{p^2} \quad (5.11)$$

Admitindo-se que o tráfego local em cada estação é dividido entre os dois barramentos proporcionalmente ao número de estações existentes a *downstream* em cada barramento, tem-se que

$$\lambda_i = \frac{\lambda\tau(M-i-1)}{M-1} \quad (5.12)$$

onde λ é a taxa média de chegada de mensagens para cada estação.

A utilização máxima da rede é dada por:

$$\rho_{max} = \frac{\left(1 - e^{-44/E\{n\}}\right)E\{n\}}{53} \quad (5.13)$$

Para $E\{n\}$ grande, o máximo valor para a utilização aproxima-se de $44/53$, ou 0.83.

A Figura 5.5 ilustra o comportamento de $E\{D\}$ em função da carga na rede.

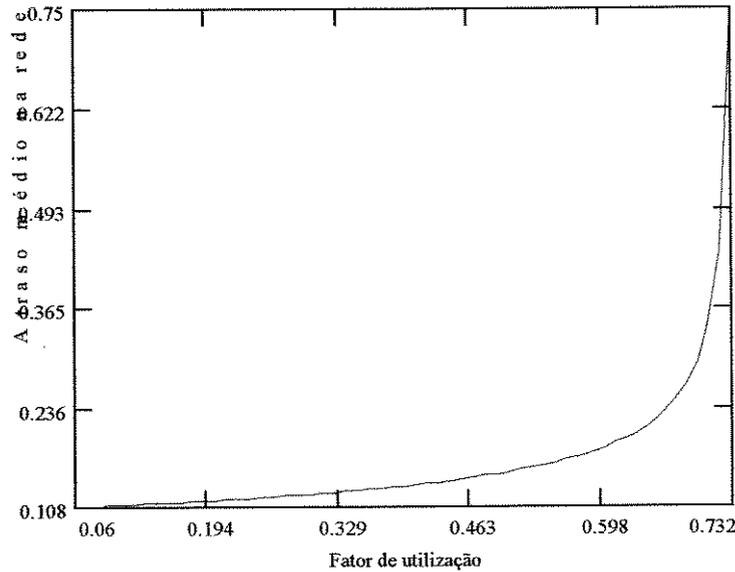


Figura 5.5 - Atraso médio sofrido por um pacote, em ms, versus fator de utilização para uma rede DQDB com 15 estações, pacotes com comprimento seguindo uma distribuição exponencial, com valor médio igual a 500 *bytes*, tempo de transmissão de um slot igual a 8.48 μ s.

Os atrasos são proporcionais ao tempo de transmissão do *slot*, portanto inversamente proporcionais a taxa de transmissão, e são independentes do tamanho da rede e da latência de cada estação, mas dependem do número de estações na rede.

A Figura 5.6 mostra a comparação entre o tempo médio para transmitir uma mensagem de 500 bytes (com distribuição exponencial) em uma rede DQDB e em uma rede FDDI. Na rede DQDB considerou-se 15 estações e dois barramentos de 50 Mbps, enquanto na rede FDDI considerou-se 15 estações, com uma latência total no anel de 0.1 ms e uma taxa de transmissão de 100 Mbps. A Figura 5.6 mostra que o FDDI pode apresentar desempenho superior ou inferior ao DQDB, dependendo da escolha do parâmetro TTRT.

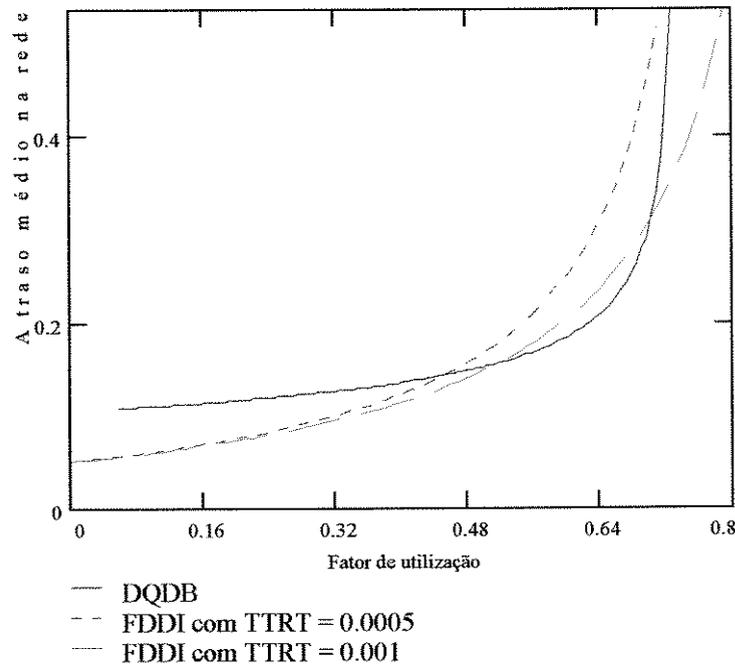


Figura 5.6 – Atraso médio para transmissão de mensagem em rede DQDB e FDDI

Na rede DQDB, quando um *slot* ocupado passa por uma estação, ele não pode ser utilizado, mesmo que a estação de destino já tenha recebido a mensagem. Se a estação de destino “apagasse” o *slot*, ela liberaria o seu uso para as estações posteriores na rede, aumentando assim a vazão da rede. No entanto, o atraso sofrido por cada *slot* em cada estação aumentaria, pois as estações precisariam ler o endereço de destino antes de retransmitir a célula. Por esta razão, opta-se por implementar um número limitado de estações apagadoras na rede. Garret e Li mostraram em [Garret91] que a utilização de um número pequeno de estações apagadoras é suficiente para incrementar significativamente a vazão da rede.

Outra técnica para incrementar a vazão da rede é o pré-uso de *slots*, onde estações que desejam transmitir para estações vizinhas utilizam-se de *slots* vazios, mesmo que estes estejam reservados para outras estações. Este mecanismo permite que um mesmo *slot* possa ser utilizado várias vezes [Pach93].

4. REDES ALL-OPTICAL

Nas redes *all-optical* o fluxo de dados têm uma única conversão eletro-óptica no nó de origem e uma única conversão opto-elétrica no nó de destino; uma vez transmitido, o fluxo de dados alcança o nó destino sem qualquer conversão intermediária.

Estas redes se baseiam, geralmente, no múltiplo acesso por divisão de comprimento de onda (WDMA - *Wavelength Division Multiple Access*), onde a banda passante do meio óptico, da ordem de dezenas de Tbps, é dividida em diversas sub-bandas, e a cada sub-banda é associada uma portadora óptica, com um determinado comprimento de onda, que é utilizada para o estabelecimento de um canal de comunicação no meio.

“Uma rede *all-optical* é uma estrutura de interconexão baseada em fibra óptica, consistindo de um meio óptico mais a funcionalidade óptica dos nós de acesso” [Laarhuis95]. Na Figura 5.7 os nós de acesso são divididos em uma parte elétrica (E) e uma parte óptica (O) e o limite da rede *all-optical*, constituído pela parte óptica dos nós de acesso, é definido pela linha pontilhada.

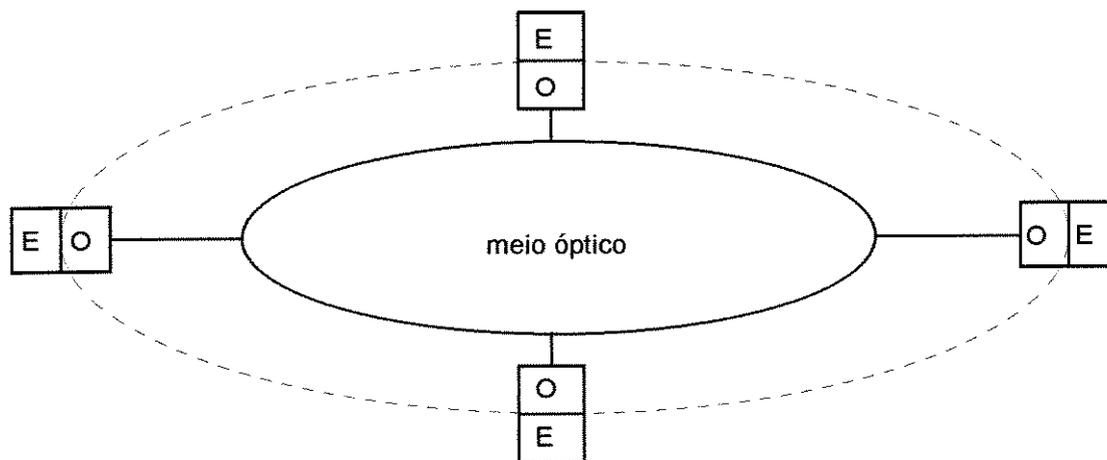


Figura 5.7 - Representação de uma rede *all-optical*.

A parte óptica do nó de acesso consiste de um (ou mais) transmissor óptico e um (ou mais) receptor óptico, cada um conectado a uma fibra, como mostra a Figura 5.8.

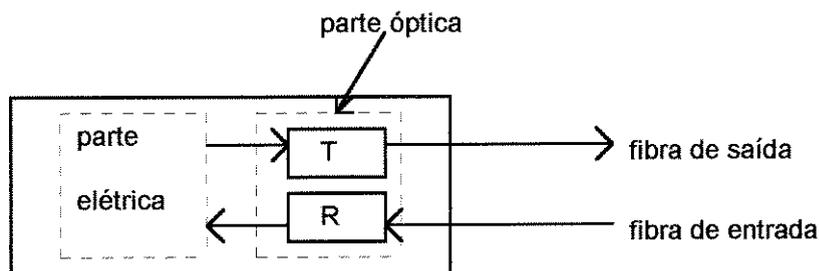


Figura 5.8 - Diagrama em blocos de um nó de acesso.

A cada transmissor e receptor óptico é alocado um conjunto de comprimentos de onda, denotados por Λ_i^t e Λ_i^r respectivamente. Para se implementar a parte óptica da estação pode-se utilizar transmissores e/ou receptores sintonizáveis, que são capazes de alterar seu comprimento de onda de operação, ou transmissores e/ou receptores com configuração em *array*, com um dispositivo de transmissão e um dispositivo de recepção para cada comprimento de onda do conjunto. A Figura 5.9 ilustra as duas configurações possíveis para o transmissor e para o receptor.

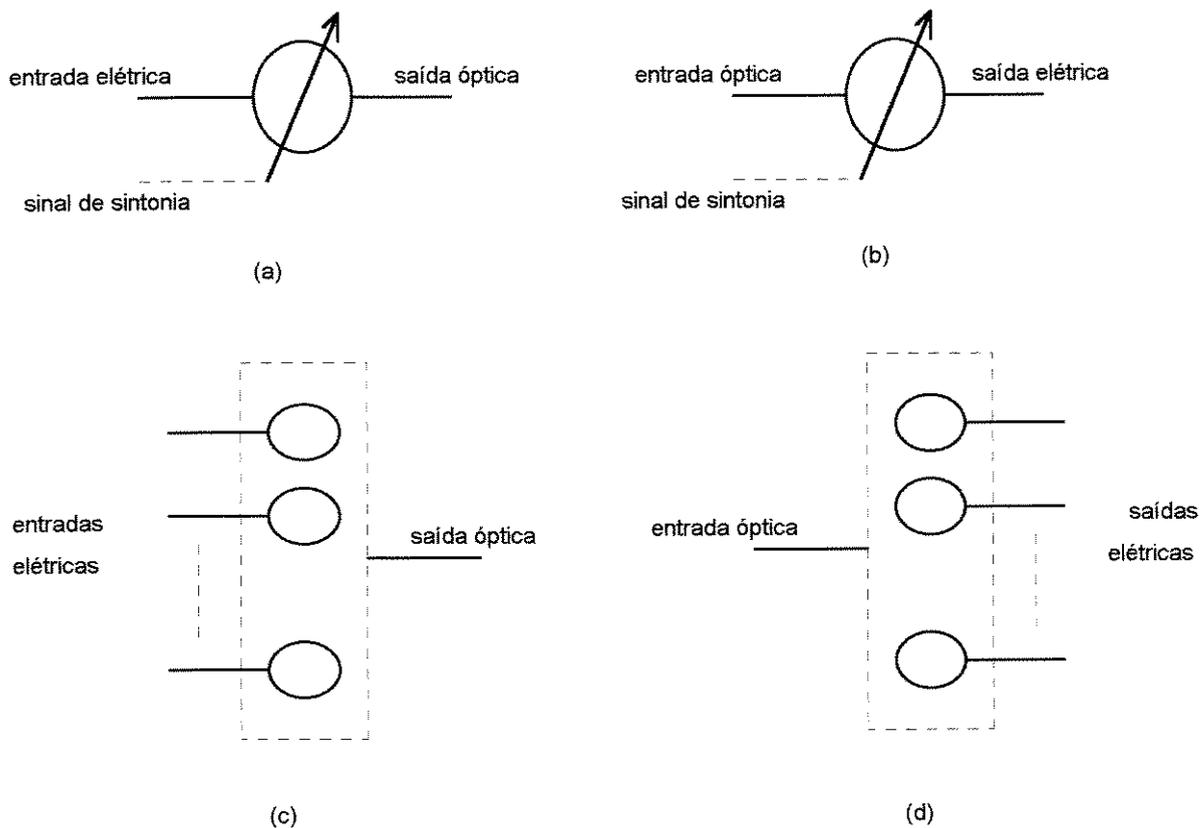


Figura 5.9 - (a) Transmissor sintonizável, (b) Receptor sintonizável, (c) Transmissor em *array*, (d) Receptor em *array*.

O meio óptico é composto das fibras ópticas e de um ou mais nós trânsito, que consistem de um ou mais dispositivos ópticos (divisores de potência, combinadores, roteadores de comprimento de onda, comutadores espaciais, amplificadores ópticos, etc.).

A forma como os nós de acesso estão interconectados, através dos nós trânsito, define a topologia física da rede, que pode ser em estrela, barramento, anel ou em malha.

4.1. CLASSIFICAÇÃO DAS REDES ALL-OPTICAL

As redes *all-optical* podem ser classificadas quanto a funcionalidade dos nós trânsito em duas categorias: redes do tipo *broadcast-and-select* ou redes com roteamento em comprimento de onda [Laarhuis95].

As redes *broadcast and select* apresentam características adequadas para aplicações em redes locais e metropolitanas, mas inadequadas para redes WAN, devido a limitações de potência e deficiência no reuso de comprimentos de onda, onde as redes com roteamento são mais apropriadas [Mokhtar98].

4.1.1. REDES COM ROTEAMENTO EM COMPRIMENTO DE ONDA

Nas redes com roteamento em comprimento de onda o sinal que chega a uma porta de entrada do nó é encaminhado a uma saída de acordo com seu comprimento de onda e com a matriz de encaminhamento definida para o nó. A Figura 5.10 exemplifica a implementação de uma rede com 3 nós de acesso, cada um deles equipado com um transmissor e um receptor sintonizáveis. O nó trânsito é implementado com dispositivos WDM passivos. A matriz de encaminhamento do nó define como os sinais que chegam em cada entrada são encaminhados pelo nó trânsito, em função de seu comprimento de onda. Por exemplo, um sinal chegando do transmissor T1, com comprimento de onda λ_1 , será encaminhado para o receptor R3, enquanto um sinal entrando pela porta 2 (conectada ao transmissor T2), com o mesmo comprimento de onda, será encaminhado para o receptor R1.

Três relações de interconexão podem ser distinguidas:

- Entradas e saídas em comprimento de onda: O nó trânsito tem somente uma porta de entrada e uma porta de saída. A portadora na entrada é encaminhada para a saída no mesmo ou em outro comprimento de onda.
- Entradas e saídas espaciais: O nó trânsito executa roteamento espacial, isto é, uma portadora presente em uma porta de entrada é encaminhada para a porta de saída correspondente.
- Entradas e saídas espaciais e em comprimento de onda: O comprimento de onda de uma portadora em uma dada porta de entrada determina para qual porta de saída ela será encaminhada. Um caso particular deste tipo de rede, onde não há conversão de comprimento de onda, é denominado de rede com roteamento espacial dependente do comprimento de onda.

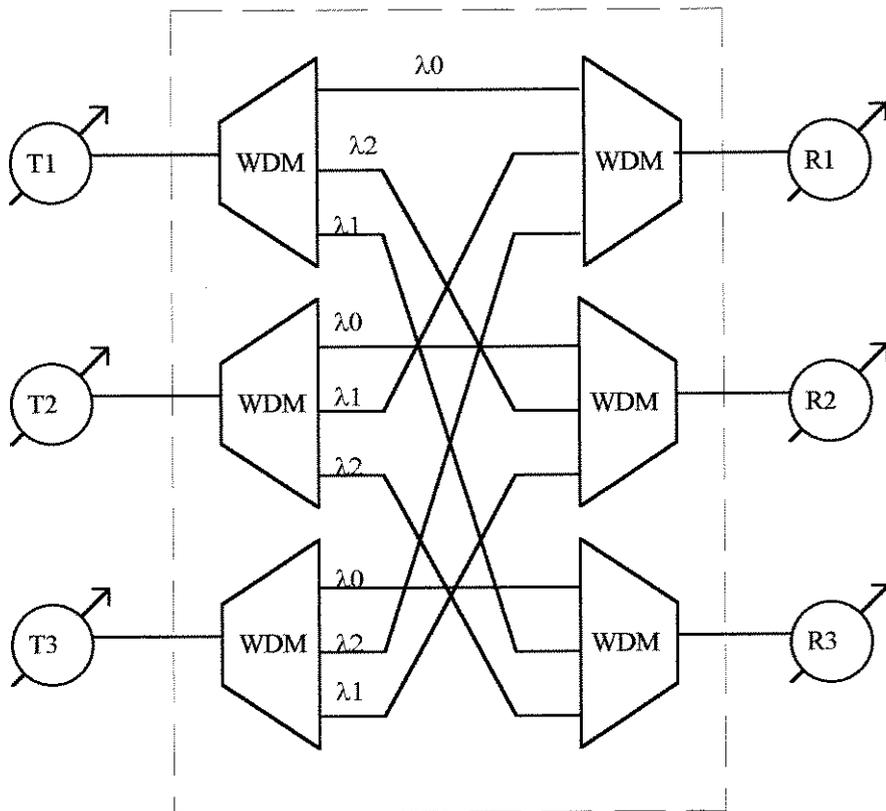


Figura 5.10 - Rede com roteamento em comprimento de onda.

4.1.2. REDES BROADCAST-AND-SELECT

Uma portadora presente em uma porta de entrada do nó trânsito de uma rede *broadcast-and-select* é difundida para todas as portas de saída do nó, independentemente de seu comprimento de onda e da porta de entrada.

Na Figura 5.11 tem-se uma rede *broadcast-and-select* com topologia em estrela onde todos os canais transmitidos, cada um operando em um comprimento de onda distinto, são combinados em um nó trânsito (acoplador $N \times N$) e difundidos para os nós receptores. A rede é composta por nós de acesso com um único transmissor (T_i) e um único receptor (R_i), os transmissores são de sintonia fixa, e os receptores são sintonizáveis em alguns nós (R_1, R_2, R_i) e com configuração em *array* em outros (R_n). O sinal transmitido pelo transmissor do nó de acesso 2, com comprimento de onda λ_2 , aparece em todos os receptores, o mesmo acontece para os sinais transmitidos por todos os outros nós de acesso. A técnica de múltiplo acesso utilizada neste caso é denominada de Múltiplo Acesso por Divisão de Comprimento de Onda (WDMA - Wavelength Division Multiple Access).

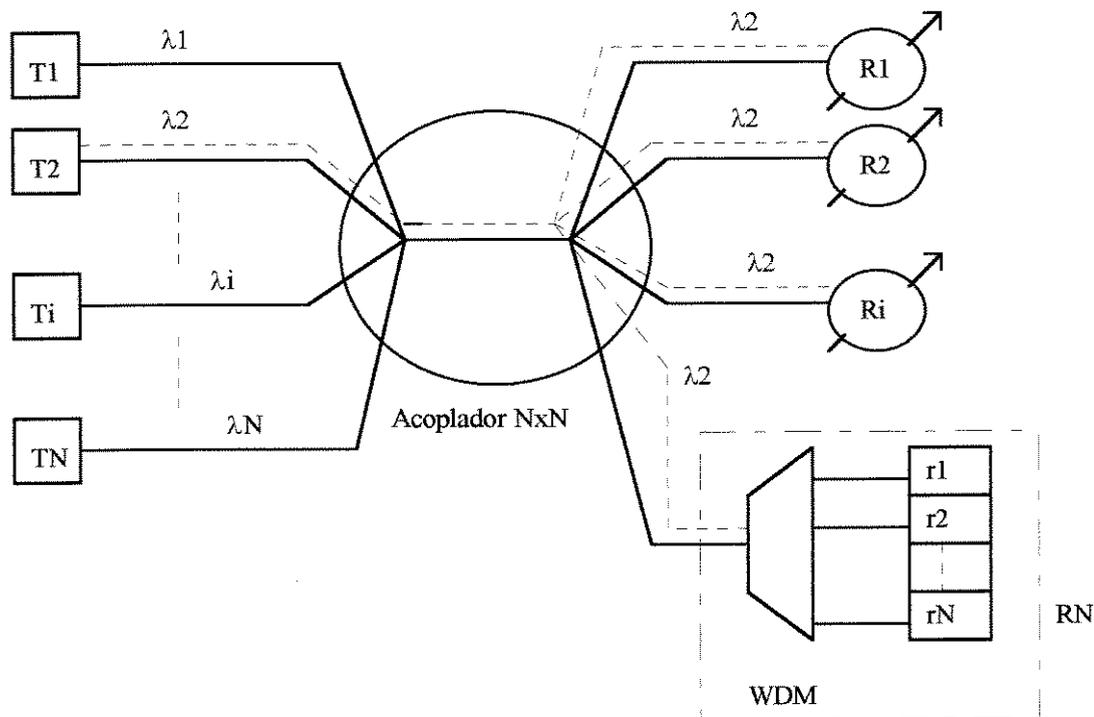


Figura 5.11 - Rede *broadcast-and-select* com topologia em estrela.

Para as redes *broadcast-and-select* define-se três tipos de implementação: endereçamento no destino, endereçamento na fonte, e multi-barramento. A rede do tipo multibarramento apresenta um desempenho superior às outras duas quanto à capacidade de transmissão, particularmente quando o conjunto de comprimentos de onda (Λ_{tot}) é grande.

ENDERECAMENTO NO DESTINO: Os transmissores são sintonizáveis, podendo transmitir em qualquer comprimento de onda do conjunto definido para rede, enquanto cada receptor tem um comprimento de onda de operação fixo:

$$\Lambda_i^t = \Lambda_{tot} = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{Z-1}\} \quad \Lambda_j^r = \lambda_j \quad i, j \in \{0, 1, \dots, Z-1\}$$

Se cada nó possui um único transmissor sintonizável e um único receptor fixo, as conexões na rede se limitam às conexões ponto-a-ponto. Para que várias fontes enviem dados simultaneamente para um mesmo destino, é necessário que os receptores possuam mais de um receptor fixo. Da mesma forma, caso se deseje implementar funcionalidade *multicast* (uma fonte enviando informação simultaneamente para vários destinos), é necessário que os nós da rede tenham mais de um transmissor sintonizável.

Um conflito de acesso de comunicação pode ocorrer se dois ou mais nós de acesso transmitirem simultaneamente para um mesmo receptor.

Se Z é igual ao número de nós de acesso na rede (M) o transmissor deve ser capaz de sintonizar todos os M comprimentos de onda definidos para a rede. Existe sempre um limite para

o número de comprimentos de onda que podem ser sintonizados (de forma fixa ou variável) por um transmissor ou receptor óptico, resultando portanto em uma limitação (tecnológica) no número de nós de acesso suportados pela rede, denominada de *gargalo de comprimento de onda*. Uma alternativa para aumentar o número de nós de acesso é fazer $Z < M$, ou seja, permitindo que um mesmo comprimento de onda seja compartilhado por mais de um receptor.

Um conflito de acesso pode ocorrer quando dois ou mais transmissores desejam transmitir para dois receptores diferentes que utilizam o mesmo comprimento de onda. Uma das transmissões será bloqueada, resultando em uma diminuição da capacidade da rede.

ENDERECAMENTO NA FONTE: Os transmissores possuem sintonia fixa e os receptores são sintonizáveis, devendo ser capazes de sintonizar qualquer comprimento de onda do conjunto definido para a rede:

$$\Lambda_j^r = \Lambda_{tot} = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{Z-1}\} \quad \Lambda_i^t = \lambda_i \quad i, j \in \{0, 1, \dots, Z-1\}$$

Além das comunicações ponto-a-ponto, é possível transmissões em *multicast* sem qualquer complexidade adicional, bastando que os receptores sintonizem o comprimento de onda do transmissor. Para que várias fontes transmitam simultaneamente para um mesmo destino, é preciso que os nós de acesso sejam equipados com mais de um receptor sintonizável

No caso de $Z = M$, como todos os transmissores operam com comprimentos de onda diferentes, não há conflito de acesso. No entanto, um *conflito de alocação* ocorrerá quando dois nós transmitirem simultaneamente para um mesmo nó, uma vez que o receptor só pode sintonizar um comprimento de onda por vez

Se $Z < M$, um conflito de acesso pode ocorrer quando dois ou mais transmissores que utilizam o mesmo comprimento de onda transmitem simultaneamente, mesmo que para receptores diferentes. Neste caso uma das transmissões será bloqueada, resultando em uma diminuição da capacidade da rede.

MULTIBARRAMENTO: Nas redes multibarramento tanto os transmissores quanto os receptores são sintonizáveis, sendo o conjunto de comprimentos de onda definido para a rede comum a ambos:

$$\Lambda_j^r = \Lambda_i^t = \Lambda_{tot} = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{Z-1}\} \quad i, j \in \{0, 1, \dots, Z-1\}$$

Comunicações ponto-a-ponto e *multicast* são realizadas sem complexidade adicional. As comunicações em que mais de um transmissor envia mensagens para um mesmo receptor são possíveis se o nó possuir mais de um receptor sintonizável ou se os transmissores compartilharem no tempo um comprimento de onda comum.

A maior flexibilidade é obtida ao custo de protocolos mais complexos, uma vez que transmissores e receptores devem ser controlados para coordenar o fluxo de dados na rede.

Nas redes em multibarramento pode ocorrer conflito de acesso e conflito de alocação. No exemplo ilustrado pela Figura 5.12 ocorrerá um conflito de acesso se $\lambda_i = \lambda_j$, e um conflito de alocação se $\lambda_i \neq \lambda_j$ e o receptor estiver sintonizado em λ_i ou λ_j ou em nenhum dos dois.

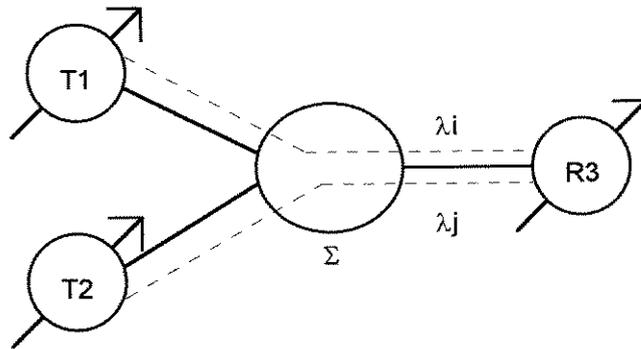


Figura 5.12 - Conflitos em redes multibarramento.

Se $Z < M$, uma situação de bloqueio ocorre quando todos os comprimentos de onda disponíveis estiverem em uso em um dado momento.

4.2. MÚLTIPLO ACESSO EM REDES ALL-OPTICAL

4.2.1. TÉCNICAS DE ACESSO ALEATÓRIO

O uso das técnicas de acesso aleatório está limitado às redes com endereçamento no destino, onde um nó de acesso fonte ajusta seu comprimento de onda àquele correspondente ao receptor do nó destino. Se duas ou mais estações transmitem para um mesmo destino ocorre uma colisão, acarretando a necessidade de se retransmitir os pacotes colididos. A probabilidade de uma colisão é igual a probabilidade de dois ou mais nós transmitirem para um mesmo receptor. Se a rede opera com um número de comprimentos de onda menor do que o número de estações ($Z < M$) esta probabilidade aumenta, uma vez que a transmissão de um nó de acesso fonte alcança mais de um receptor.

A detecção de colisão deve ser implementada através de mensagem de reconhecimento (ou ausência dela) por parte do destino, uma vez que o recurso de auto-monitoramento do canal, onde a estação transmissora monitora sua própria transmissão (utilizado por exemplo na técnica CSMA-CD), só é possível em redes *broadcast-and-select* com canais de transmissão e recepção idênticos para cada nó, não sendo portanto implementável em redes com endereçamento no destino. Portanto, um nó transmissor aguarda um período de tempo igual, no mínimo, a duas vezes o tempo de propagação para certificar-se se o pacote foi recebido com sucesso ou não. No máximo um pacote novo pode então ser transmitido a cada duas vezes o tempo de propagação, fazendo com que a vazão da rede seja reduzida se o tempo de propagação for grande comparado com o tempo de transmissão do pacote, o que normalmente

ocorre nas redes *all-optical*. Assim, esta classe de protocolos, embora simples, não é adequada a este tipo de rede, por apresentar um baixo desempenho.

4.2.2. TÉCNICAS COM ALOCAÇÃO FIXA

Os canais são compartilhados de forma que não ocorra conflito na rede. A capacidade de cada canal é dividida em um determinado número de janelas, cada janela sendo usada para transmissão de um pacote em um ciclo. Se $Z = M$, o número de janelas necessárias em cada ciclo para se evitar conflitos é igual ao número de nós de acesso na rede (M).

A capacidade das conexões entre qualquer par transmissor-receptor é fixa, sendo frequentemente igual para todas as conexões. Portanto, esta classe de protocolos só é adequada quando o tráfego é alto e tem as mesmas características para todos os nós de acesso, que é usualmente o caso nas redes para interconexão de redes, onde o tráfego que chega aos nós é o agregado do tráfego proveniente de diversas estações de menor tráfego.

4.2.3. TÉCNICAS COM ALOCAÇÃO POR DEMANDA

O estabelecimento de uma conexão é baseado em uma negociação entre os nós de acesso (controle distribuído), ou é regulado por um elemento central (controle centralizado). Adicionalmente aos canais de dados existe um canal de controle utilizado para troca de informações necessária para a coordenação do acesso aos canais.

Nos mecanismos de acesso por demanda a capacidade de transmissão pode ser adaptada às necessidades de tráfego da rede, permitindo uma maior eficiência na utilização dos recursos da mesma e maior flexibilidade para acomodar flutuações na carga gerada por cada nó de acesso, tornando-os adequados para o uso em redes LANs e MANs.

Nas redes com controle distribuído, dependendo do protocolo utilizado, o canal de controle pode transportar mensagens do tipo anúncios de transmissão ou reservas de transmissão.

- **Anúncios de transmissão:** uma estação que deseja transmitir envia pelo canal de controle um pacote contendo informações para o estabelecimento da conexão (comprimento de onda e endereço de destino para redes com endereçamento na fonte; endereço da fonte e destino para redes com endereçamento no destino; e comprimento de onda e endereço de fonte e destino para redes multibarramento). Os receptores da rede monitoram permanente o canal de controle e utilizam as informações nele presente para o estabelecimento das conexões.
- **Reservas de transmissão:** as estações transmitem pelo canal de controle a informação de todos os destinos com os quais ela deseja se comunicar, ou seja, cada um dos nós de acesso deve informar pelo canal de controle se ele tem pacotes para transmitir para cada um dos $M-1$ possíveis destinos. As $M(M-1)$ informações de *status* devem ser enviadas em um ciclo, podendo resultar na necessidade de canais controle com grande capacidade. Todos os nós possuem informação global do

comportamento de tráfego na rede, e utilizam esta informação como uma lista de reservas de transmissão. Um algoritmo comum a todos os nós é utilizado para definir quem transmite em que comprimento de onda, exceto quando o mecanismo de endereçamento na fonte é utilizado.

O canal de controle é compartilhado entre os diversos nós, necessitando portanto de um mecanismo de controle de acesso. Este mecanismo pode ser aleatório ou com alocação fixa.

Nos acessos aleatórios pode haver colisão no canal de controle. A utilização de auto-monitoramento para detectar a colisão é possível, uma vez que todos os receptores monitoram este canal.

Nas técnicas com alocação fixa o canal de controle é dividido em janelas, usualmente por divisão de tempo. As janelas podem ser associadas aos nós de acesso ou aos canais de dados. No primeiro caso a cada nó de acesso é alocada uma (de M) janela em um ciclo, sendo o acesso ao canal de controle livre de contenção. Quando as janelas são associadas aos canais de dados, cada ciclo é composto de Λ_{tot} janelas. Um nó que deseja transmitir por um canal de dados particular utiliza a janela do canal de controle correspondente para informar os demais nós. O acesso ao canal de controle é baseado em contenção, uma vez que mais de um nó de acesso pode desejar transmitir pelo mesmo canal de dados.

Após a transmissão da informação de controle os nós podem transmitir seus pacotes de dados imediatamente (transmissão incondicional), independentemente do que ocorreu com o pacote de controle, ou após a confirmação da entrega do pacote de controle ou o processamento do mesmo (transmissão condicional). Em redes com mecanismo de acesso do canal de controle baseado em contenção, a utilização de transmissão incondicional resulta na propagação dos efeitos de uma colisão no canal de controle para o canal de dados. Por outro lado, nas redes com transmissão condicional existe um atraso inerente entre o final da transmissão da informação de controle e o início da transmissão dos dados, que é no mínimo igual ao tempo de propagação na mesma. Se a probabilidade de colisão no canal de controle é baixa, a transmissão incondicional resulta em maior eficiência.

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram analisados os protocolos de acesso das redes FDDI e DQDB. Mostrou-se que a vazão máxima das redes FDDI depende do número de estações, da latência do anel e do parâmetro TTRT, enquanto a vazão máxima do DQDB independe das características da rede e está limitada ao valor de 0.83.

Os protocolos de acesso nas redes *all-optical* também foram analisados. Verificou-se que as técnicas de alocação por demanda são as mais adequadas para o uso em redes LANs e MANs.

CAPÍTULO VI - REDES LOCAIS SEM FIO E REDES ATM SEM FIO

As comunicações faixa larga e as comunicações sem fio são duas das principais forças propulsoras do desenvolvimento das telecomunicações na atualidade.

Nas redes de faixa larga, a tecnologia ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), tem sido considerada a que irá predominar, devido a capacidade e flexibilidade para suportar uma grande gama de serviços com qualidade adequada a cada um.

As redes locais sem fio tem crescido com taxa significativa nos últimos anos, resultado dos avanços nas comunicações digitais, computadores portáteis e tecnologia de semicondutores. Essas redes tem sido utilizadas em ambientes onde se deseja oferecer mobilidade aos usuários e/ou em ambientes onde a instalação de cabos é impraticável ou de custo elevado, como em ambientes comerciais e industriais, ambientes de feiras e convenções, universidades e hospitais, construções históricas, etc [LaMaire96] [Padgett95].

Recentemente, motivado pela expansão do desenvolvimento de aplicações de telecomunicações e computação baseadas em equipamentos portáteis, tem havido um considerável interesse em se estender os conceitos da rede ATM para o ambiente sem fio, ou seja, permitir que um usuário móvel possa, através de um terminal portátil, acessar a rede ATM.

A escolha do protocolo de múltiplo acesso para as redes locais sem fio e para as redes ATM sem fio é analisada neste capítulo. No primeiro caso, após a descrição das características da rede, analisa-se os protocolos MACA, MACAW e DFWMAC; por último, faz-se uma descrição das redes ATM sem fio e estuda-se os fatores que afetam a escolha do protocolo de acesso.

1. REDES LOCAIS SEM FIO

Nas redes locais sem fio deseja-se usufruir as vantagens oferecidas pela mobilidade, sem perda de desempenho ou limitação de facilidades. No entanto, as redes locais sem fio apresentam alguns problemas, como por exemplo:

- Necessidade de alocação de frequência;
- Ocorrência de interferências causadas pela transmissão simultânea de duas ou mais estações ou por *fading* multipercurso;
- Taxas de erro de bit elevadas, se comparado às redes com fio;
- Maior vulnerabilidade na segurança das informações;
- Pouca disponibilidade de potência nos dispositivos móveis;
- Mobilidade dos usuários.

Como mostrado na Figura 6.1, as redes sem fio podem assumir duas topologias básicas: uma onde as estações acessam uma rede *backbone* através de pontos de acesso (estações rádio-base), e outra onde um grupo de estações se comunicam diretamente em uma rede *ad hoc*, independentemente de qualquer infra-estrutura ou estação rádio-base.

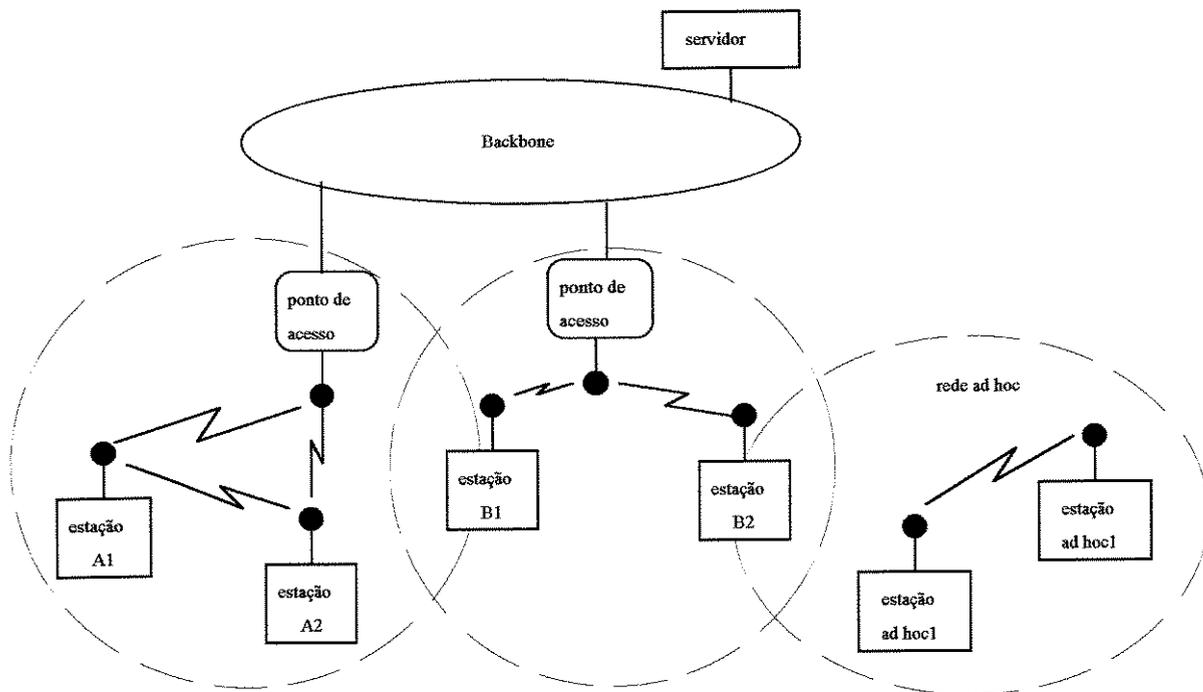


Figura 6.1 - Topologia básica de uma rede sem fio.

A estrutura de rede *ad hoc* é formada por um mínimo de duas estações e, normalmente, está associada a aplicações com pequena área de cobertura (por exemplo, estações compartilhando recursos e informações em um pequeno grupo de trabalho ou em uma conferência). A pequena área de cobertura não garante, devido a problemas de propagação, uma topologia em malha completa, sendo mais comum uma topologia em malha irregular, como mostrado na Figura 6.2. As duas formas básicas de implementação de uma rede *ad hoc* são [Chen94]:

- **Broadcast e Inundação:** Qualquer nó que tenha um pacote para transmitir o faz, utilizando algum tipo de protocolo de múltiplo acesso. Quando um nó recebe um pacote ele verifica o endereço de destino e retransmite o pacote caso o mesmo não seja destinado a ele; mecanismos de controle devem ser implementados de modo a evitar a explosão de pacotes na rede. A vazão no canal é baixa, e o uso de *broadcast* não garante conectividade total entre os nós, sendo possível que os usuários tenham que procurar uma “boa localização” para uma recepção adequada.
- **Eleição, temporária, de uma estação como rádio-base.** Esta abordagem é útil apenas em redes com pequeno número de nós, uma vez que a complexidade dos algoritmos de escolha da estação rádio-base cresce significativamente com o número de nós. Devido ao *fading*, é necessário que este procedimento seja atualizado periodicamente.

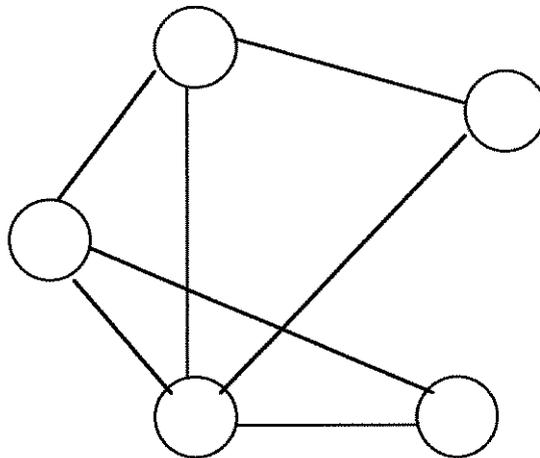


Figura 6.2 - Topologia típica de uma rede Ad Hoc.

Na topologia com acesso à rede *backbone* a área total de cobertura é dividida em células (ou área de serviço básico - *Basic Service Area* - BSA), sendo cada célula atendida por um ponto de acesso. Os pontos de acesso estão interligados através da rede *backbone*, que pode ser uma rede com fio ou mesmo outra rede sem fio. Todas as estações em uma célula (que constituem, na nomenclatura do padrão IEEE 802.11, um *Basic Service Set* - BSS) podem comunicar-se entre si; uma BSS isolada com suas estações forma uma rede *ad hoc*.

Algumas características e problemas, inerentes às redes sem fio, que influenciam na definição do protocolo de acesso são [Chen94]:

- *Multicast* - Uma transmissão *multicast* é endereçada a diversas estações simultaneamente. Se o pacote chega com erro a qualquer uma das estações, ele deve ser retransmitido. No processo de retransmissão um pacote pode chegar com erro em uma estação que já o havia recebido corretamente. Como exemplo, seja uma rede com 200 estações na área de cobertura da estação rádio-base, que transmite pacotes de 1000 bits de comprimento, onde se tem uma taxa de erro de bit de 10^{-5} . A taxa de erro de pacotes nesta rede é 10^{-2} , e a probabilidade que ao menos uma estação receba um pacote com erro é 0.866, resultando em um número médio de transmissões necessárias para que todas as estações recebam o pacote corretamente de 7.46. Uma forma de contornar este problema é fazer com que a estação descarte um pacote recebido com erro, caso o mesmo já tenha sido recebido; outra forma é eliminar o uso da mensagem de reconhecimento para as transmissões *multicast*, mas a entrega correta dos pacotes não é garantida.
- *Justiça de Acesso* - Devido as características de desvanecimento do ambiente *indoor*, o nível de potência recebida pela estação rádio-base pode variar significativamente de uma estação para outra, mesmo que se utilize mecanismos de controle de potência. Diferenças de níveis de potência recebida da ordem de 6 a 9 dB pode resultar no efeito de captura, no qual a estação com maior nível de potência recebida pela rádio-base pode impedir que as demais estações tenham chance de obter o acesso ao meio.

- Consumo de Potência da Baterias - O uso eficiente da energia disponível nas baterias resulta em uma maior disponibilidade de tempo de utilização para o usuário móvel. O período de tempo em que a estação está operando no modo recepção é o fator dominante no processo de gerência do uso da potência disponível, tornando desejável que o receptor possa operar em um modo denominado modo adormecido.
- Robustez - O protocolo deve permitir que as redes sem fio operem em ambientes sujeitos a interferências causadas por outras redes instaladas na mesma região.
- Habilidade para suportar *handoff* - A mobilidade do usuário permite que ele saia da área de cobertura de uma estação rádio-base e entre na área de outra estação rádio-base. A função que permite a uma estação móvel deixar de se comunicar com uma estação rádio-base e passar a se comunicar com outra é denominada de *handoff*, e deve ser executada de modo que a estação móvel não sofra nenhuma interrupção no processo de comunicação. A presença de desvanecimentos rápidos característicos em ambiente *indoor* é um complicador adicional para as redes locais sem fio. O *handoff* pode ser controlado por um elemento central (controle centralizado) ou pelas próprias estações móveis (controle distribuído). A abordagem com controle centralizado, utilizada nas redes de telefonia celular, não é prática para as redes LANs, onde o controle distribuído é mais indicado.
- Não-reciprocidade do tráfego - É comum a utilização do esquema cliente-servidor nas redes locais. Como consequência, o tráfego no sentido rádio-base para móvel (*down-link*) é usualmente muito mais intenso do que o tráfego no sentido móvel para rádio-base (*uplink*).
- Estação escondida (*hidden station problem*) - Devido a problemas de propagação ou por interferências provocadas pelo reuso das mesmas características do meio físico em outra célula, pode acontecer de algumas estações ficarem “escondidas” das outras. A Figura 6.3 ilustra o problema: A estação A está transmitindo para a estação B. Uma transmissão da estação C, que está fora da área de cobertura de A e portanto não pode receber suas transmissões, para qualquer outra estação irá interferir com a transmissão da estação A.

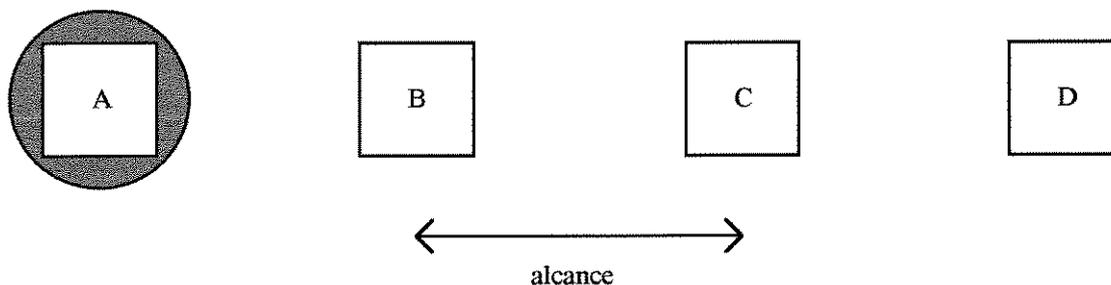


Figura 6.3 - Problema da Estação Escondida.

1.1. ANÁLISE DOS PROTOCOLOS DE ACESSO

O uso de protocolos do tipo CSMA não é adequado para as redes sem fio, pois uma estação que deseje transmitir analisa a existência de interferência local para decidir se transmite ou não, quando o que importa nas redes sem fio é a interferência na estação de destino da informação, ou seja, o que é relevante é a contenção no receptor, e não no transmissor. Para ilustrar esta idéia, veja a Figura 6.3: a estação A está transmitindo para a estação B, a estação C, que está fora do alcance de A e portanto não pode receber sua transmissão, deseja transmitir. A estação C escuta o meio e, por percebê-lo livre, inicia sua transmissão, interferindo na recepção da estação B (*hidden station problem*). Outro problema possível: a estação B está transmitindo para A; a estação C deseja transmitir para a estação D, mas não o faz por sentir o meio ocupado pela estação B. No entanto, se a estação D estiver fora do alcance da estação B, a transmissão poderia ser feita sem que B interferisse em D e C interferisse em A. Este problema é conhecido como problema da estação exposta (*exposed station problem*) [Bharghavan94]. Esta análise vale para o protocolo CSMA-CD, que ainda possui o problema adicional da dificuldade de se detectar colisão no ambiente das redes sem fio [Chen94].

1.1.1. MULTIPLE ACCESS WITH COLLISION AVOIDANCE (MACA)

Karn apresentou em 1990 a proposta de um protocolo de acesso denominado *MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)* onde introduziu o uso de um *handshaking* entre as estações [Bharghavan94]: quando uma estação A deseja transmitir envia inicialmente à estação de destino B, uma mensagem de controle denominada *Request-to-Send (RTS)* que contém o comprimento do pacote de dados a ser enviado. Quando a estação B recebe o RTS ela responde, quando possível, com uma mensagem de *Clear-to-Send (CTS)*, que também contém o tamanho do pacote de dados a ser enviado por A. Após receber CTS, a estação A inicia imediatamente a transmissão dos seus dados. Qualquer estação que escute uma mensagem de RTS atrasa todas as suas transmissões até o final da transmissão da mensagem de CTS. Qualquer estação que escute uma mensagem de CTS atrasa suas transmissões até o instante previsto para término da transmissão do pacote de dados associado àquele CTS.

O protocolo é ilustrado no diagrama mostrado na Figura 6.4, admitindo-se que cada estação só possa ouvir as mensagens enviadas pelas estações vizinhas. Os seguintes eventos podem ser observados:

1. A estação C envia um RTS para a estação D indicando que deseja transmitir um pacote de dados e informando o tamanho do mesmo. O RTS também é recebido pela estação B, e faz com que esta estação atrase qualquer iniciativa de transmissão até o final da transmissão do CTS (em resposta ao RTS). Observa-se que a estação B estima o instante de término da transmissão de CTS, uma vez que ela não consegue escutá-lo.
2. A estação E escuta a mensagem de CTS enviada pela estação D, e usa a informação do tamanho de bloco de dados a ser transmitido pela estação C para determinar até que instante ela deve permanecer quieta.

3. A estação F envia um RTS para a estação E, que não responde prontamente, uma vez que ela não pode transmitir até o instante descrito no evento 2.
4. A estação B deseja fazer uma transmissão para a estação A, mas só envia a mensagem de RTS após o final da transmissão do CTS por parte da estação D.
5. A estação A recebe o RTS e responde prontamente com CTS. No entanto, a estação B não conseguirá perceber esta mensagem, pois a mesma irá sofrer interferência do pacote de dados transmitido pela estação C.
6. Quando uma estação envia um RTS e não recebe o CTS correspondente, ela assume que houve uma colisão, gera um atraso aleatório (usando o algoritmo *binary exponential backoff* - BEB), e reinicia o processo de tentativa de transmissão.

Pode haver colisão entre mensagens de RTS ou entre uma mensagem de RTS e uma mensagem de CTS, como ilustra a Figura 6.5. Observa-se que as estações não escutam o meio para decidir se podem enviar suas mensagens de RTS.

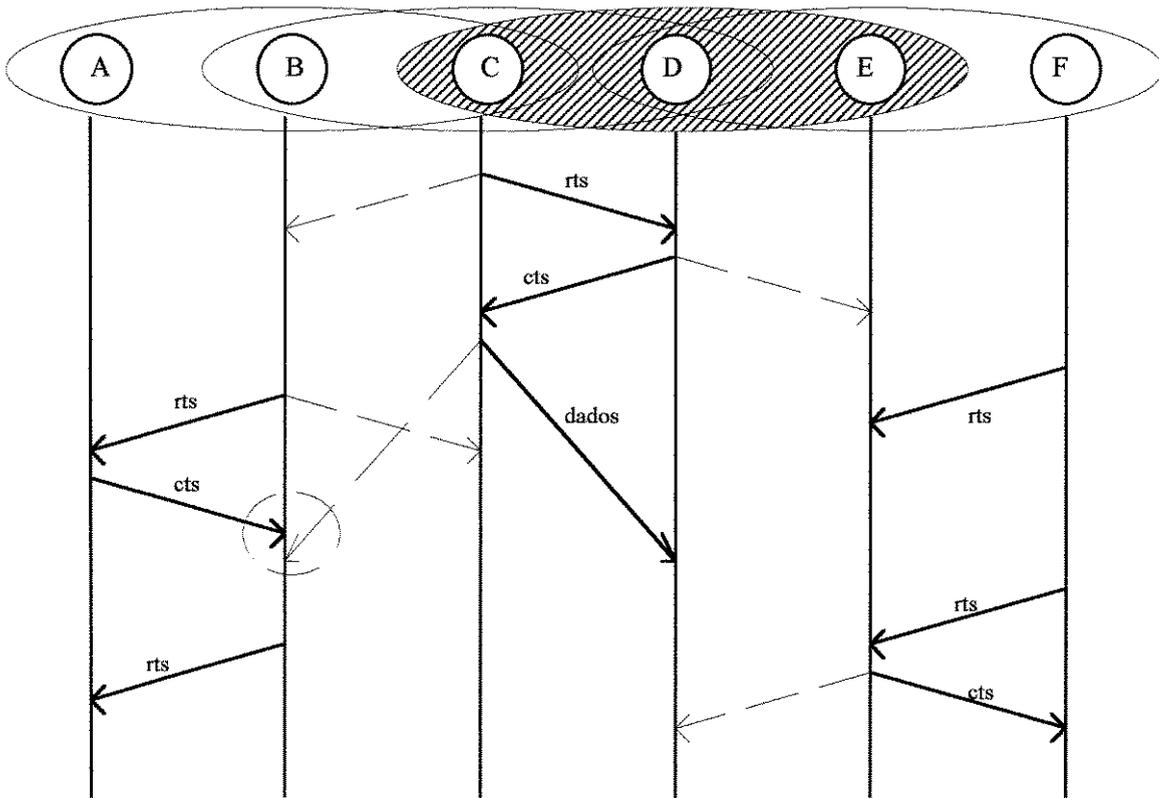


Figura 6.4 - Princípio de operação do protocolo MACA.

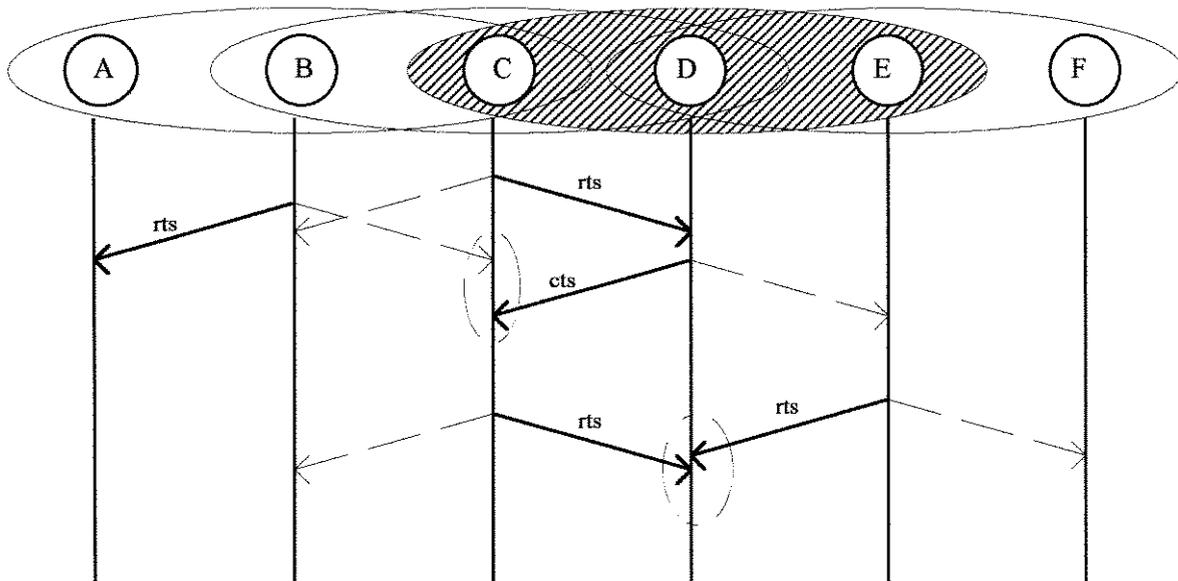


Figura 6.5 - Colisões no protocolo MACA.

1.1.2. MULTIPLE ACCESS WITH COLLISION AVOIDANCE FOR WIRELESS LAN'S (MACAW)

A técnica de múltiplo acesso MACAW foi proposta em [Bharghavan94] como uma evolução do protocolo MACA. As principais alterações sugeridas foram:

ALGORITMO DE BACKOFF: No algoritmo exponencial binário (BEB) utilizado no MACA as estações geram, em caso de insucesso na troca de mensagens RTS-CTS, um atraso aleatório, segundo uma distribuição uniforme, entre 1 e o valor armazenado no contador de *backoff* (BO). O valor deste contador é dobrado após cada colisão, até um limite máximo denominado BO_{max} , e é reduzido ao seu valor mínimo (BO_{min}) após cada troca com sucesso de mensagens RTS-CTS. Este mecanismo pode resultar no seguinte problema: seja uma célula em que todas as estações, com exceção de uma, possuem valores altos em seus contadores de *backoff*, após uma colisão, é mais provável que a estação com menor valor de *backoff* ganhe o direito de transmissão. Se isto ocorrer, esta estação irá alterar o valor do seu contador para BO_{min} e as demais irão duplicar o valor de seus contadores. Este fenômeno é recorrente e a cada nova colisão é cada vez mais improvável que as estações com valor alto no contador consigam acessar o meio. Se não existir um valor máximo para o contador de *backoff*, é possível que uma única estação consiga monopolizar o canal. A injustiça no tratamento das estações, causada pelos diferentes valores dos contadores de *backoff*, resulta das estações fazerem a escolha do atraso aleatório com base apenas na informação local de congestionamento da rede.

Para contornar este problema as estações devem incluir no cabeçalho do pacote o valor corrente do seu contador de *backoff*. Qualquer estação que escute este pacote irá transferir este valor para o seu próprio contador. Após cada transmissão com sucesso, todas as estações

passarão a ter o mesmo valor armazenado no contador de *backoff* e terão a mesma probabilidade de ganhar o direito de transmissão em uma próxima contenção.

Um problema com esta nova versão do algoritmo BEB pode ocorrer quando tem-se várias estações em uma mesma célula com uma alta demanda de transmissão. Nesta situação, após cada transmissão com sucesso todas as estações teriam seus contadores com valor igual a BO_{min} , podendo resultar em algumas colisões adicionais antes que uma estação conseguisse adquirir o meio. Para evitar variações muito grandes nos valores dos contadores de *backoff* o valor do contador de *backoff* é incrementado por um fator multiplicativo de 1.5, após uma colisão, e decrementado de um, após uma transmissão com sucesso. Este algoritmo é denominado MILD (*Multiplicative Increase and Linear Decrease*).

O algoritmo MILD pode apresentar problemas quando células adjacentes possuem diferentes níveis de congestionamento. Por exemplo, a Figura 6.6 mostra uma rede com duas células, C1 e C2. A célula C1, com 4 estações móveis e uma estação rádio-base, possui um alto nível de congestionamento, enquanto a célula C2, com duas estações móveis e uma rádio-base, possui um nível baixo. As estações móveis M1 a M5 podem se ouvir mutuamente. Quando a estação M5 escuta um pacote transmitido por uma estação de C1, ela copia o valor do contador de *backoff* presente no cabeçalho do pacote para o seu contador. Transmissões posteriores de M5 irão propagar este alto valor de contador de *backoff* para dentro da célula C2, criando uma situação artificial de alto congestionamento em C2. Da mesma forma, se M5 faz uma transmissão em um momento em que seu contador de *backoff* tem um baixo valor, esta transmissão será ouvida pelas estações M1-M4 da célula C1, e posteriormente para a rádio-base de C1, fazendo com que as estações de C1 acreditem estar em um ambiente com baixo nível de congestionamento.

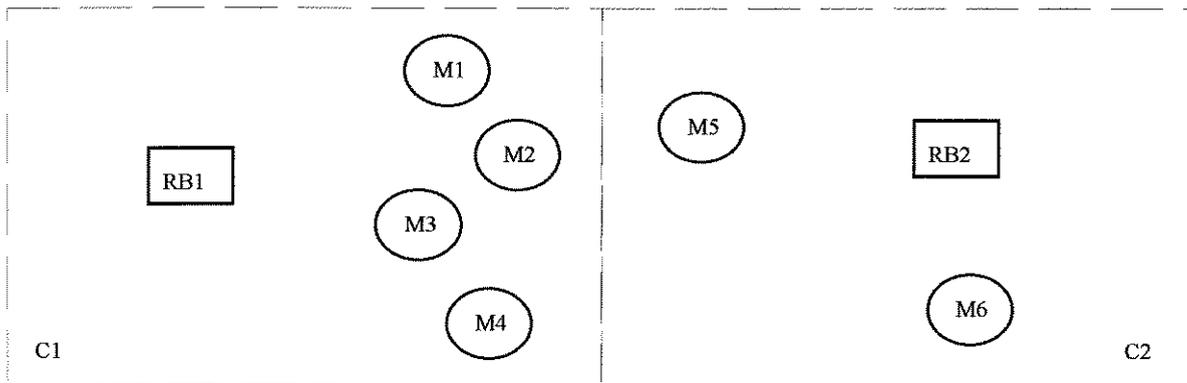


Figura 6.6 - Rede com células adjacentes e níveis diferentes de congestionamento em cada célula.

Outro problema possível surge quando uma estação é desligada ou abandona a célula. Para ilustrar, a Figura 6.7 mostra uma célula com 3 estações móveis que estavam se comunicando com a estação rádio-base quando uma delas (M1) foi desligada. No próximo envio de RTS da estação rádio-base para a estação M1 esta não irá responder; a ausência de CTS será interpretada pela rádio-base como uma colisão, causando o incremento de seu contador de

backoff, que será propagado para as outras estações pelo mecanismo de cópia do valor de *backoff* contido no cabeçalho do pacote utilizado no algoritmo MILD, causando uma situação artificial de alto nível de congestionamento na rede.

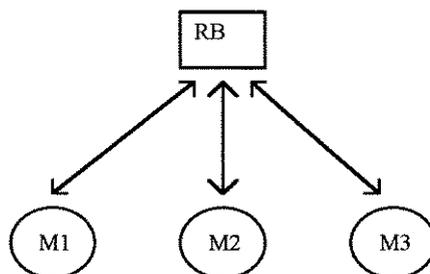


Figura 6.7 - Célula com 3 estações móveis onde M1 foi desligada.

Para minimizar estes problemas cada estação deve manter um contador de backoff para cada fluxo de dados na rede.

INCLUSÃO DE UMA MENSAGEM DE RECONHECIMENTO (ACK): Muitas aplicações utilizadas nas redes locais sem fio requerem uma comunicação confiável na qual o transmissor precisa saber se o dado chegou corretamente ao receptor. No protocolo MACA o erro, causado por uma colisão ou introduzido pelo canal, é recuperado pela camada de transporte, resultando em um atraso significativo.

A inclusão de uma mensagem de reconhecimento transmitida pelo receptor após o recebimento de cada pacote recebido corretamente permite a correção dos erros na camada de enlace. O *overhead* adicional é compensado, para probabilidade de perdas de pacote superiores a 1 pacote com erro em 1000, pela menor perda de tempo para recuperação do erro, como mostra a Tabela 6.1, que resume os resultados de simulação apresentados em [Bharghavan94].

Taxa de Erro de Pacote	Sem uso de ACK	Com uso de ACK
0	40.41	36.76
0.001	36.58	36.67
0.01	16.65	35.52
0.1	2.48	9.93

Tabela 6.1 - Comparação de vazão, em pacotes por segundo, entre o protocolo MACA e um protocolo que utiliza ACK na camada de enlace.

INCLUSÃO DE UMA MENSAGEM DE DATA-SENDING (DS): Na discussão do problema do terminal exposto concluiu-se que a estação C deveria estar livre para transmitir, uma vez que sua transmissão não alcançaria a estação A e, conseqüentemente, não iria interferir com a estação B (veja Figura 6.3).

Na troca de dados ilustrada na Figura 6.4, a estação B aparece como estação exposta. No entanto, percebe-se que a tentativa de transmissão de B para A não obtém sucesso, uma vez que a estação B não consegue escutar o CTS enviado por A, devido a interferência dos dados que estão sendo transmitidos por C. O fato de B ter enviado um RTS e não ter recebido um CTS provoca um incremento no seu contador de *backoff*. Conclui-se então que a estação B deve adiar sua transmissão enquanto a estação C está transmitindo seus dados. Deve-se notar que a estação B escutou o RTS enviado pela estação C mas não escutou o CTS de resposta enviado pela estação D; portanto, B não sabe se a estação C está realmente transmitindo seus dados.

Este problema pode ser resolvido através do uso de mecanismo de *carrier-sense* nas estações ou através da introdução de uma mensagem denominada Data-Sending (DS). Nesta última solução, antes de enviar o pacote de dados, a estação envia uma mensagem curta de DS (com 30 bytes). Toda estação que escuta este pacote sabe que a troca RTS-CTS foi efetuada com sucesso, e que a transmissão dos dados está prestes a ocorrer. Assim, qualquer uma destas estações que deseje transmitir irá atrasar sua transmissão até o término da transmissão do ACK.

EXEMPLO DE TROCA DE DADOS: A Figura 6.8 ilustra a troca de dados em uma rede com seis estações utilizando o protocolo MACAW. Os seguintes eventos podem ser observados:

1. A estação C transmite um pacote de dados para a estação D, onde se observa a sequência RTS-CTS-DS-DADOS-ACK;
2. A estação B deseja transmitir para A, mas só envia o RTS após o fim da transmissão do ACK;
3. A estação E percebe o CTS transmitido por D e, por isso, suspende qualquer transmissão até o fim da transmissão dos dados por parte daquela estação, não respondendo portanto ao RTS da estação F.

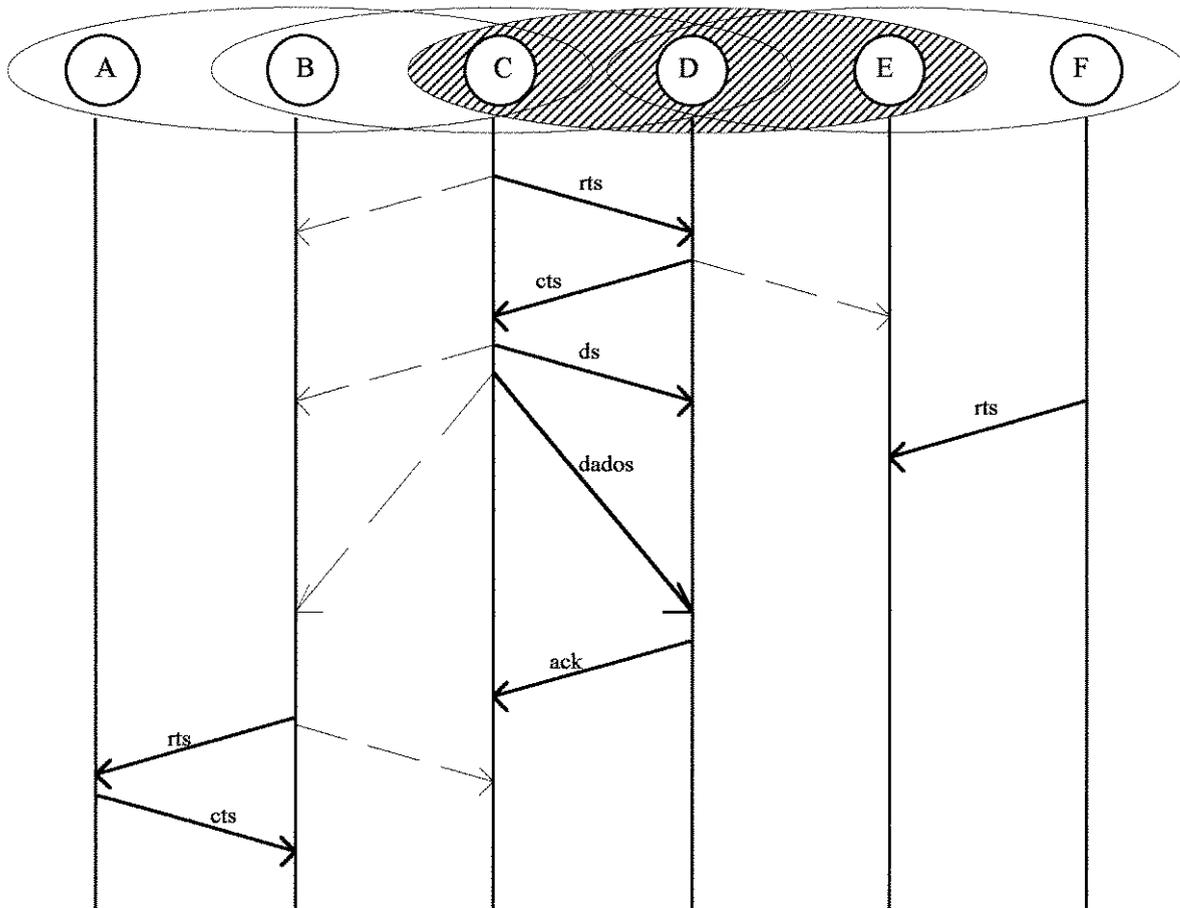


Figura 6.8 - Troca de dados no protocolo MACAW.

1.1.3. DISTRIBUTED FOUNDATION WIRELESS MEDIUM ACCESS CONTROL (DFWMAC)

O DFWMAC é o protocolo definido no padrão IEEE 802.11 para suportar tráfego de dados assíncrono em redes locais sem fio. Neste protocolo uma estação que deseja transmitir deve primeiro verificar se o meio está livre ou não, em caso positivo a estação espera por um período de tempo denominado DIFS (*Distributed Coordination Function Inter-Frame Space*) e amostra o canal novamente. Se o canal continua livre a estação envia seu pacote. A estação receptora verifica se o pacote foi recebido corretamente e, em caso positivo, transmite uma mensagem de reconhecimento positivo (ACK) após um período de tempo denominado SIFS (*Short Inter-Frame Space*). Quando o pacote de dados é transmitido, o campo de duração no cabeçalho é utilizado para informar para as demais estações por quanto tempo o meio permanecerá ocupado, incluindo-se o intervalo SIFS e o tempo de transmissão do ACK. As estações utilizam esta informação para ajustar um contador denominado Vetor de Alocação de Rede (*Network Allocation Vector - NAV*), que é utilizado como um mecanismo de detecção de portadora virtual. O conteúdo do contador NAV indica a cada estação a quantidade de tempo que a mesma deve esperar até que a sessão de transmissão corrente

esteja completa e, como consequência, o meio seja dado como livre novamente. A Figura 6.9 ilustra o procedimento básico para transmissão de um pacote.

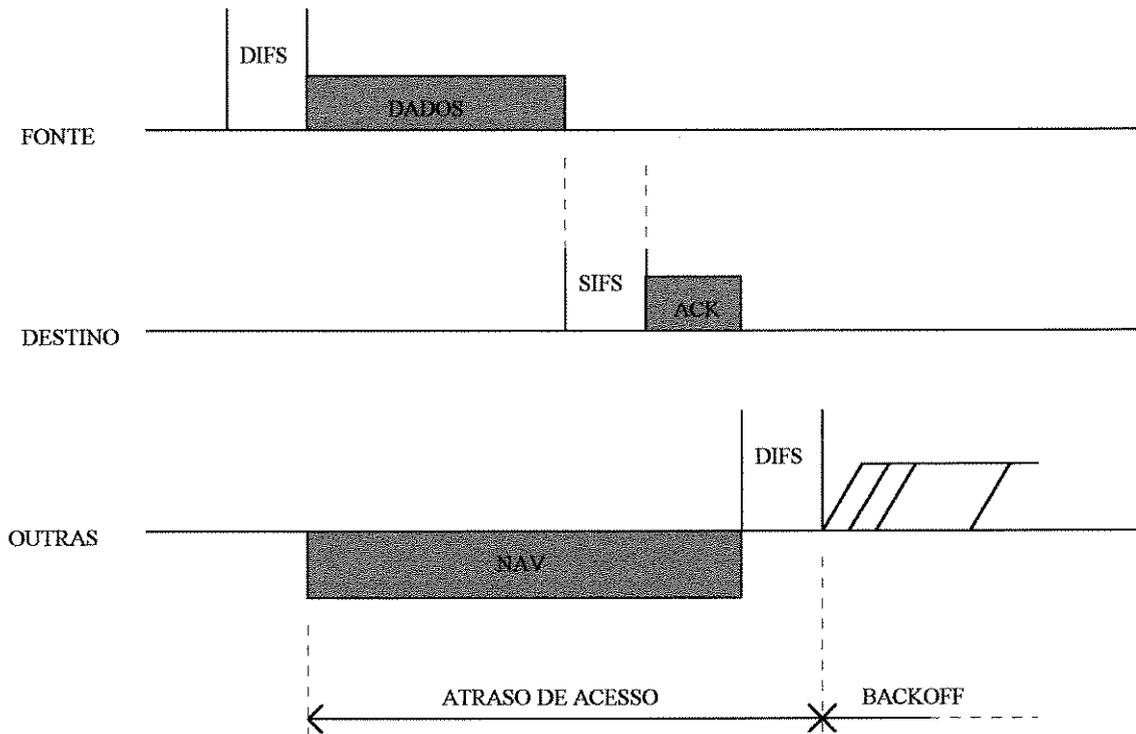


Figura 6.9 - Procedimento básico de transmissão do protocolo DFWMAC.

Para evitar colisão, uma estação que deseja transmitir e que tenha detectado o meio ocupado, aguarda o fim da transmissão, um período igual a DIFS, e então gera um atraso aleatório (*backoff* na Figura 6.9), que é igual a um número inteiro de janelas de tempo, cada um com duração estabelecida pelo parâmetro Slot_Time. O período de tempo decorrido entre o atraso DIFS e o início da próxima transmissão é denominado de janela de contenção. Se nenhuma outra estação iniciou uma transmissão antes desta janela (isto é, se nenhuma outra estação escolheu aleatoriamente uma janela de tempo anterior), a estação pode então iniciar sua transmissão. Se qualquer outra estação tiver selecionado uma janela de tempo anterior, a estação fixa seu contador de *backoff*, espera o fim da transmissão desta estação, e então espera pelo número de janelas de tempo restantes no contador. Colisões podem ocorrer apenas se duas estações escolherem a mesma janela de tempo. A Figura 6.10 ilustra este procedimento: as estações A, B, C e D desejam transmitir e percebem o meio ocupado. Após o término da transmissão corrente e após um período igual a DIFS, os conteúdos dos contadores de *backoff* das estações são (escolhidos aleatoriamente entre 0 e 7): $BO_B = 4$, $BO_C = 1$, $BO_D = 3$. Assim, após a primeira janela de tempo a estação C transmite e as estações B e D fixam seus contadores com os conteúdos: $BO_B = 3$ e $BO_D = 2$. Após o término da transmissão da estação C, e após um novo período igual a DIFS, as estações voltam a decrementar seus contadores. A estação D transmite então ao final da segunda janela de tempo, fixando o contador da estação B com o valor 1. Finalmente, após o término da

transmissão da estação D, do período igual a DIFS, e de mais uma janela de tempo, a estação B transmite [Weinmiller].

Se duas ou mais estações tiverem seus contadores de *backoff* decrementados a zero simultaneamente, ocorrerá uma colisão. Neste caso, as estações devem gerar um novo atraso aleatório, que agora será um número aleatório inteiro de janelas de tempo uniformemente distribuído entre 0 e 15.

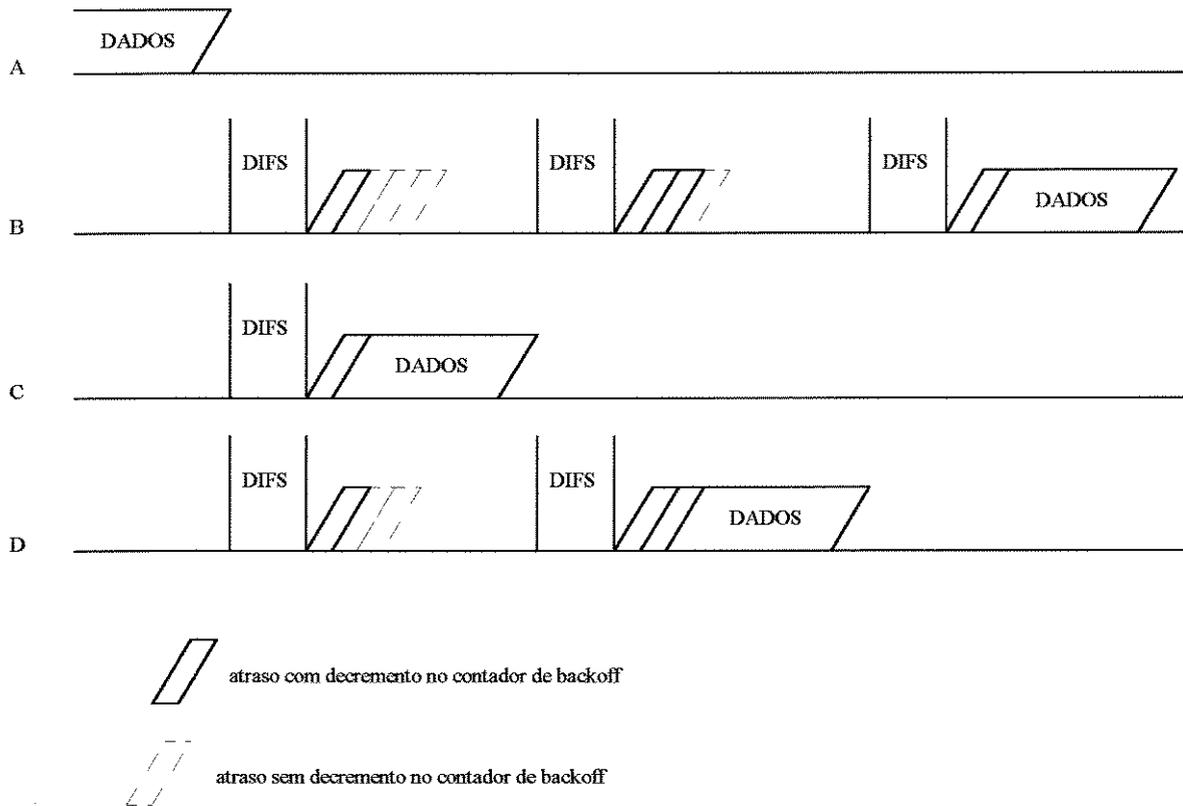


Figura 6.10 - Mecanismo de atraso para evitar colisão .

O procedimento básico ilustrado pelas Figuras 6.9 e 6.10 apresenta dois problemas:

- O problema do terminal escondido já descrito;
- Nas redes sem fio as estações normalmente não conseguem escutar o meio enquanto estão transmitindo. Logo, as estações só conseguem detectar a ocorrência de uma colisão pela ausência da mensagem de ACK. Se o pacote é longo (seu tamanho máximo é 2346 octetos), tem-se uma perda razoável de capacidade de transmissão quando ocorre uma colisão.

Para contornar estes problemas as estações podem utilizar, opcionalmente, as mensagens de controle RTS e CTS para reservar o canal antes de iniciar a transmissão do pacote de dados, de modo semelhante aos protocolos MACA e MACAW. Neste caso, as estações da rede podem ajustar o valor do seu contador NAV com base nas mensagens de RTS ou CTS ou com base no pacote de dados, conforme ilustrado na Figura 6.11 [Crow96].

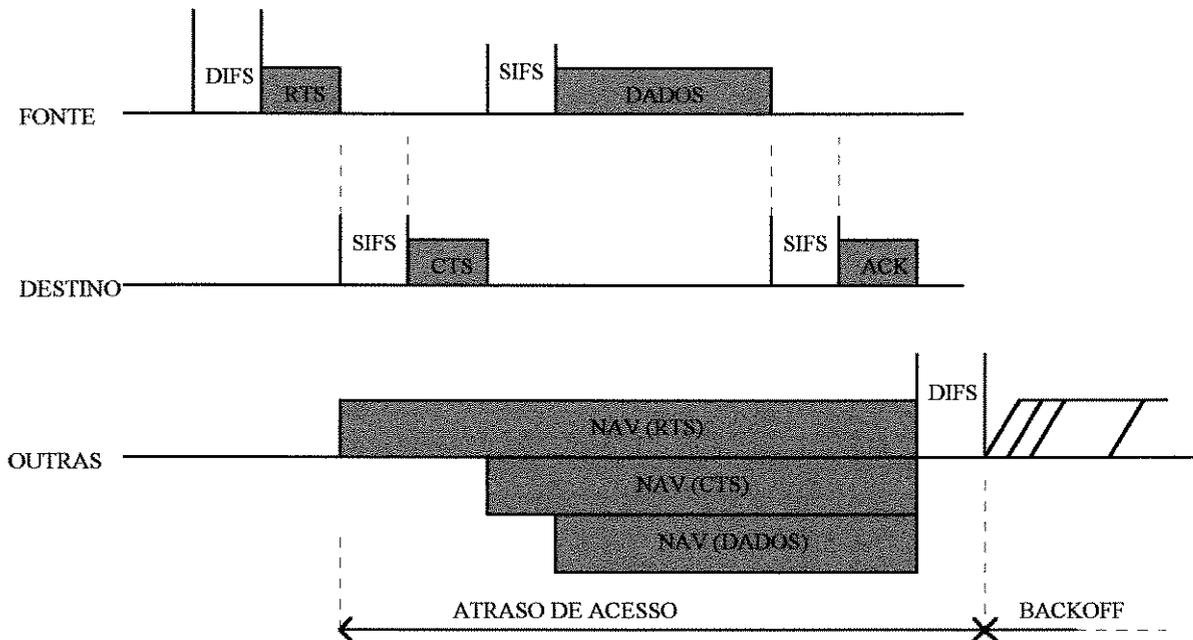


Figura 6.11 - Uso de RTS e CTS no protocolo DFWMAC.

As estações podem escolher entre sempre utilizar o *handshaking* RTS/CTS, nunca utilizá-lo, ou utilizá-lo quando o comprimento do pacote exceder o valor definido pelo parâmetro `RTS_Threshold` (gerenciável).

Se o pacote é muito longo, pode-se optar por fragmentá-lo antes da transmissão. O parâmetro `Fragmentation_Threshold` estabelece o limite para o comprimento de cada segmento do pacote. Quando um pacote é segmentado, todos os fragmentos são transmitidos seqüencialmente, o canal não é liberado até que o pacote inteiro tenha sido transmitido com sucesso ou até que a estação fonte falhe em receber um ACK para um fragmento transmitido. A estação fonte mantém o controle do canal durante a transmissão de todo pacote, esperando apenas um período SIFS, após o recebimento de cada ACK, antes de transmitir o próximo segmento. Quando um ACK não é recebido, a fonte pára a transmissão e inicia uma nova disputa (com as demais estações da rede) pelo canal; uma vez ganho o acesso, ela volta a transmitir a partir do fragmento não reconhecido pelo destino, utilizando portanto o protocolo Stop-and-Wait. Se RTS e CTS são utilizados, apenas o primeiro fragmento é enviado utilizando o mecanismo de *handshaking*. O campo de duração de transmissão contém neste caso apenas o tempo necessário para transmissão do primeiro fragmento e do ACK correspondente, a informação de duração dos demais fragmentos é obtida pelas estações nos próprios fragmentos [Crow96].

Alguns indicativos de desempenho, para uma rede *ad hoc*, com base em simulação são [Crow96]:

- A vazão é fortemente dependente da taxa de erro de bit no canal, tendo valores em torno de 77% para canais com taxa de erro de bit de 0.75×10^{-6} e da ordem de 7% para $BER = 0.75 \times 10^{-3}$.
- A vazão obtida em canais com erros em surtos, com $BER = 0.75 \times 10^{-3}$, é da ordem de 20%, devido ao fato do agrupamento de erros resultar em um menor número de pacotes errados para uma mesma BER. No entanto, se a qualidade do canal é boa (por exemplo para $BER = 0.75 \times 10^{-6}$), o fato dos erros ocorrerem em rajada não traz ganho significativo, e a vazão máxima continua sendo em torno de 77%.
- Para se maximizar a vazão, o parâmetro `RTS_Threshold` deve ser fixado em torno de 250 octetos. Valores altos de `RTS_Threshold` levam a baixos valores de vazão, devido ao efeito das colisões nos pacotes de dados.
- Se a taxa de erro de bit no canal é baixa, a vazão tende a aumentar com o incremento do parâmetro `Fragmentation_Threshold` (até um certo limite). Por outro lado, para altas taxas de erro, a vazão cai com o aumento de `Fragmentation_Threshold`. Como a taxa de erro no canal pode flutuar significativamente no ambiente das redes sem fio, o valor de `Fragmentation_Threshold` deve ser uma solução de compromisso.

2. REDES ATM SEM FIO

A escolha da tecnologia ATM para uma rede sem fio multimídia integrada é motivada pelo fato das futuras redes de telecomunicações faixa larga serem, provavelmente, baseadas na tecnologia ATM. Esta abordagem permite que o usuário móvel usufrua das facilidades e funcionalidades a serem disponibilizadas na futura rede ATM, facilitando o processo de integração das redes de telecomunicações.

Os componentes básicos da rede ATM sem fio, conforme ilustrado na Figura 6.12, são [Passas97] [Kubbar97]:

- Terminais Móveis - terminais ATM providos de interface rádio;
- Pontos de acesso ou estações rádio-base;
- Comutador ATM - utilizado para a interconexão com o resto da rede ATM;
- Estação de Controle - utilizada para suportar operações relacionadas com a mobilidade, tais como: atualização de localização e *handoff*.

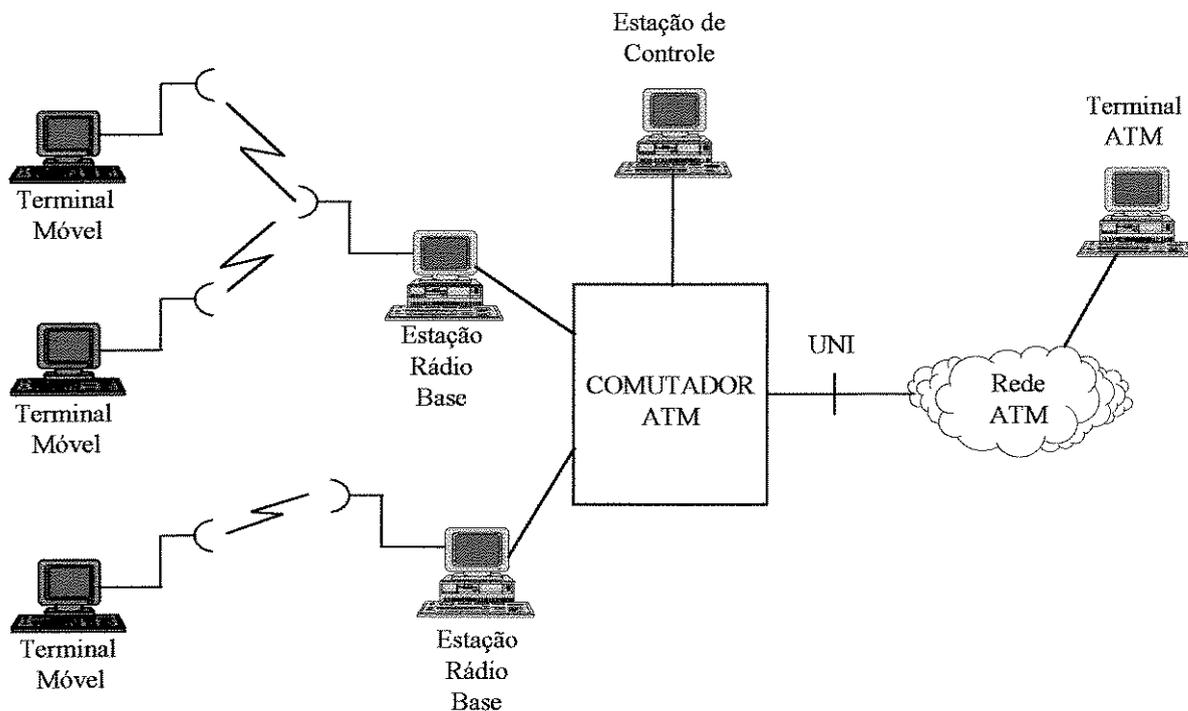


Figura 6.12 - Componentes básicos de uma rede ATM sem fio.

Similarmente às redes IEEE 802.11, prevê-se para as redes ATM sem fio a operação *ad hoc* ou através de um *backbone*.

As redes ATM foram concebidas para operar com fibra óptica como meio de transmissão, resultando em grande disponibilidade de largura de faixa, baixa taxa de erro de bit (da ordem de 10^{-10}), não-ocorrência de erros em rajadas, e constância do comportamento do meio. O canal sem fio é caracterizado por altas taxas de erro de bit, ocorrência de erros em rajadas, largura de faixa limitada e de custo mais elevado, e variância do comportamento devido a ocorrência de desvanecimento. A mobilidade do usuário acarreta a necessidade de funcionalidades adicionais, como a possibilidade de *handoff*, que pode produzir perda ou desordenação de pacotes, e torna mais complexas as funções de gerenciamento do canal virtual e da qualidade de serviço da conexão [Labiou98] [Pahlavan97] [Passas97] [Kubbar97].

Uma forma de implementação é encapsular as células ATM em um protocolo específico para o meio sem fio que supere os problemas apresentados. Embora esta solução acarrete uma diminuição na eficiência de transmissão, devido ao aumento do *overhead* (cabeçalho + *trailer*) acarretado pelo protocolo adicional, ela torna o processo de adaptação entre o acesso sem fio e a rede com fio menos complexo e mais rápido.

2.1. CONSIDERAÇÕES PARA A ESCOLHA DO PROTOCOLO DE MÚLTIPLO ACESSO

O protocolo de múltiplo acesso em uma rede ATM sem fio deve suportar todas as classes de serviço definidas para as redes ATM com fio, com o padrão de qualidade especificado para cada classe, além de apresentar boa eficiência na utilização da largura de faixa disponível.

A presença expressiva de tráfego do tipo VBR (*Variable Bit Rate*) na rede prejudica a utilização de técnicas de acesso como o FDMA e TDMA com alocação fixa. A técnica CDMA, apesar de apresentar maior eficiência na presença de tráfego em surtos, limita a taxa de transmissão de pico a valores relativamente baixos para aplicações em faixa larga, sendo portanto também desconsiderada como opção [Kubbar97] [Passas97].

As técnicas de acesso aleatória, tais como as da classe Aloha, apresentam características compatíveis com a multiplexagem estatística das redes ATM e pequeno atraso em condições de pouco tráfego. Todavia, estas técnicas apresentam mau desempenho na presença de tráfego intenso ou quando múltiplas classes de tráfego devem ser suportadas simultaneamente com QoS garantida, tornando-as também inadequadas para aplicação nas redes ATM sem fio.

As técnicas de múltiplo acesso com alocação por demanda eliminam os desperdícios de largura de faixa apresentados pelas técnicas com alocação fixa, na presença de tráfego VBR, e aleatória, devido às colisões, além de apresentar flexibilidade para o transporte simultâneo de classes de tráfego diferentes. A maior complexidade de implementação é compensada pela estabilidade sob condições de carga elevada e pela previsibilidade da QoS. Por estas razões, as técnicas de múltiplo acesso com alocação por demanda são, em geral, consideradas as mais adequadas para as redes ATM sem fio.

As técnicas com alocação por demanda baseiam-se em protocolos com reserva ou em protocolos com *polling* adaptativo. Nesta última, uma janela de tempo é alocada periodicamente a cada conexão, sem requisição, com base no tráfego estimado. Estes protocolos são mais simples que os protocolos baseados em reserva, mas seu desempenho depende do algoritmo que determina o período de *polling* para cada conexão. Se o período de *polling* é mais curto que o necessário, a eficiência de utilização do canal diminuirá. Se o período de *polling* for mais longo que o necessário, o atraso de transmissão aumenta e a QoS piora. O ajuste do período torna-se muito complexo em conexões com tráfego em rajada do tipo VBR [Passas97].

Nos protocolos com alocação por demanda baseados em reserva, em geral, o canal é dividido em janelas que são agrupadas em quadros. As transmissões do *uplink* (terminal móvel para rádio-base) e *downlink* (rádio-base para terminal móvel) podem ser feitas em frequências diferentes ou compartilhando a mesma frequência através da técnica *time-division duplex* (TDD). Na técnica TDD cada quadro é dividido em duas partes (subquadros), uma dedicada a transmissões do *uplink* e outra a transmissões do *downlink*. O subquadro do *uplink* é usualmente subdividido em janelas para requisição de recurso de transmissão (*re-*

quest access - RA) e janelas para transmissão de dados (*data transmission access* - TA), enquanto o subquadro do *downlink* é subdividido em janelas para reconhecimento (ACK) e janelas para transmissão de dados (*data downstream* - DD). A Figura 6.13 ilustra a estrutura típica de um quadro em uma técnica de múltiplo acesso com alocação por demanda [Kubbar97].

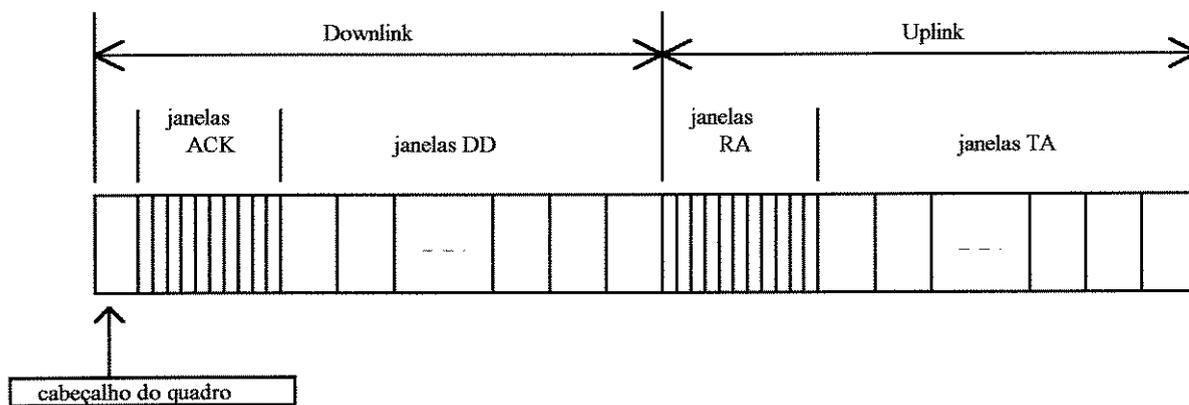


Figura 6.13 - Formato típico de um quadro em protocolos com alocação por demanda.

No subquadro do *downlink* a estação rádio-base transmite suas mensagens nas janelas DD e informa as estações móveis sobre o *status* de suas requisições através das janelas ACK, que são de comprimento muito inferior às janelas DD. As transmissões no *downlink* são usualmente no modo *broadcast* com multiplexagem por divisão no tempo (TDM - *Time Division Multiplex*). A alta eficiência apresentada pela técnica TDM faz com que o *downlink* não seja o ponto crítico de desempenho do sistema.

As transmissões no subquadro do *uplink* são regidas pelos protocolos de múltiplo acesso, que são diferentes para os dois tipos de janelas, RA e TA. O número de estações móveis ativas em um dado momento é normalmente muito menor que o número total de estações móveis do sistema, que por sua vez é maior do que a capacidade máxima de transmissão do canal. Estas características levam a escolha de protocolos de acesso aleatórios, como os da classe Aloha, para as janelas RA. Para a janela TA a técnica considerada mais favorável é a TDMA [Kubbar97] [Passas97].

O comprimento e o número de cada um dos tipos de janelas, do *uplink* e *downlink*, é variável para cada protocolo, podendo ser de natureza dinâmica ou fixa.

O principal problema associado as técnicas baseadas em reserva é o *atraso de acesso*, que é definido como o tempo que uma estação que deseja transmitir espera antes que possa iniciar sua transmissão, o que ocorrerá após uma janela TA ser alocada. Este atraso ocorrerá no início de cada comunicação e toda vez que uma estação estiver voltando ao estado de transmissão após um período no estado ocioso (sem transmissões). Se a estação tem tráfego VBR com uma aplicação em tempo real, os pacotes gerados terão de ser armazenados no *buffer* da estação durante esta espera, com implicações no atraso de transmissão do pacote (QoS) do sistema. A variação no atraso de transmissão dos pacotes (PDV - *Packet Delay*

Variation), provocada pela variação no atraso de acesso, pode resultar em um nível de QoS incompatível com os requisitos das aplicações.

Para minimizar os problemas de atraso e obter níveis de QoS compatíveis com os especificados pela rede ATM, os protocolos de acesso devem incorporar algoritmos de programação de transmissão, que irão determinar o número de janelas alocadas a cada conexão em cada quadro e a posição relativa de cada janela, de acordo com o tipo de tráfego transmitido e o grau de QoS contratado em cada conexão.

O MASCARA (*Mobile Access Scheme Based on Contention and Reservation for ATM*), brevemente descrito em [Passas97] é um exemplo de um protocolo de acesso com alocação por demanda baseado em protocolo com acesso aleatório, como *Slotted Aloha*, e TDMA.

3. CONCLUSÃO

Os protocolos de acesso MACA, MACAW e DFWMAC, para redes locais sem fio, foram descritos e os parâmetros que influenciam seus desempenhos analisados.

Partindo-se da descrição das redes ATM sem fio e de suas características, analisou-se a escolha do protocolo de acesso para estas redes. Mostrou-se que os protocolos híbridos com reserva do tipo DAMA são adequados para as redes ATM sem fio.

CAPÍTULO VII - CONCLUSÃO

As principais técnicas de múltiplo acesso e suas aplicações em sistemas de comunicações móveis terrestres, sistemas WLL, sistemas de comunicações por satélite, redes locais e metropolitanas de alta velocidade, redes *all-optical*, redes locais e redes ATM sem fio foram analisados nesta dissertação.

Os parâmetros de desempenho analisados foram a vazão, o atraso de transferência de pacote e a capacidade, em termos de número máximo de usuários na rede. Como resultado desta análise mostrou-se que:

- As técnicas de acesso com alocação fixa são as mais adequadas em redes com pequeno número de estações e padrão de tráfego elevado, estável e previsível, com destaque para a técnica TDMA; mas são ineficientes em redes com tráfego VBR ou em redes com grande número de estações.
- A comparação do desempenho das técnicas TDMA e CDMA, em sistemas de comunicações móveis e WLL, é difícil de ser concluída, uma vez que a capacidade destas técnicas depende das características da rede e do estado da arte das diversas tecnologias presentes no sistema.
- Técnicas de acesso aleatório são inadequadas em redes com tráfego misto em que se deseja QoS garantida, e em redes com carga elevada; mas são aplicáveis em redes com tráfego VBR, com grande número de estações e baixo tráfego. As técnicas aleatórias resultam no menor atraso de transferência de pacote em condições de baixo tráfego.
- Técnicas com alocação por demanda e controle centralizado não são aplicáveis em redes com grande número de estações e tempo de propagação elevado. A utilização de forma eficiente em redes com tráfego VBR requer o uso de algoritmos adaptativos.
- Técnicas com alocação por demanda e controle distribuído são opções adequadas nos ambientes de redes locais e metropolitanas de alta velocidade.
- Técnicas híbridas do tipo DAMA são adequadas em redes com perfil de tráfego variável, incluindo-se redes com tráfego VBR e tráfego misto, e em redes com grande número de estações. O uso de mecanismos de reserva explícito prejudica a aplicação destas técnicas em redes com elevado tempo de propagação.
- Os protocolos com alocação por demanda com reserva destacam-se para utilização nas redes ATM sem fio, garantindo QoS para usuários móveis.

A análise feita nesta dissertação considerou o canal livre de erros. Um próximo passo na análise do desempenho dos protocolos de múltiplo acesso é considerar o canal com taxa considerável de erro e a influência do protocolo de retransmissão utilizado no sistema.

ANEXO 01 - EXEMPLOS NUMÉRICOS

Neste anexo apresenta-se alguns exemplos numéricos envolvendo o cálculo de vazão e/ou atraso de transferência de pacote dos diversos protocolos analisados no corpo da dissertação. Com base nos resultados obtidos, confirma-se algumas conclusões quanto a aplicabilidade e limitações dos protocolos analisados.

EXEMPLO 1: Em uma rede de comunicação por satélite dez estações geram pacotes de tamanho fixo com 500 bytes de comprimento. A taxa de transmissão de cada estação é 512 kbps se a técnica TDMA é utilizada e 51.2 kbps se a técnica FDMA é utilizada. A Tabela A1.1 resume o atraso médio de transferência de pacote obtido para os dois casos, para $\rho = 0.1, 0.5$ e 0.9 .

ρ	$E\{T\}$ p/ TDMA em seg.	$E\{T\}$ p/ FDMA em seg.
0.1	0.301	0.3325
0.5	0.336	0.3672
0.9	0.648	0.6797

Tabela A1.1 - Atraso médio de transferência de pacote, com $M = 10$ estações.

Os resultados mostram a superioridade da técnica TDMA, particularmente para menores valores de ρ . Se o número de estações na rede aumenta, a diferença de desempenho entre o TDMA e o FDMA fica ainda mais acentuada, como pode ser visto na Tabela A1.2, onde considerou-se $M = 100$ estações na rede.

ρ	$E\{T\}$ p/ TDMA em seg.	$E\{T\}$ p/ FDMA em seg.
0.1	0.692	1.0747
0.5	1.039	1.4219
0.9	4.164	4.5467

Tabela A1.2 - Atraso médio de transferência de pacote, com $M = 100$ estações.

Se o atraso médio de transmissão é limitado em 1 segundo, o número máximo de estações admissível na rede em função da carga total é resumido na Tabela A1.3, onde mais uma vez nota-se a superioridade do TDMA.

ρ	M máximo p/ TDMA	M máximo p/ FDMA
0.1	171	90
0.5	95	64
0.9	19	17

Tabela A1.3 - Número máximo de estações admissível limitando-se $E\{T\}$ em 1 s.

EXEMPLO 2: Uma rede de comunicação por satélite utiliza modulação BPSK e múltiplo acesso CDMA. A máxima probabilidade de erro de bit admissível é 1×10^{-6} , o que resulta em uma relação E_b/N_0 mínima de 10.5 dB. A máxima vazão normalizada para o sistema é $S = 0.089$. Admitindo-se um ganho de processamento igual a 100, o máximo número de estações transmitindo simultaneamente é igual a 8.9.

EXEMPLO 3: Em uma rede de comunicação por satélite as estações transmitem pacotes de 500 bytes, com comprimento fixo, a uma taxa de 512 kbps. As estações são capazes de escutar suas próprias transmissões e o tempo de propagação é de 250 ms. Em caso de colisão, as estações geram um atraso aleatório uniformemente distribuído entre 1 e 50 vezes o tempo de transmissão de um pacote. Para uma vazão $S = 0.1$, o atraso de transferência do pacote é de 0.39 [s] ou 0.315 [s], dependendo se a rede utiliza múltiplo acesso *Aloha* ou *Slotted Aloha*. Se a vazão é $S = 0.3$, o atraso para o *Slotted Aloha* é de 0.548 [s], não sendo possível utilizar a técnica *Aloha*.

EXEMPLO 4: Uma Rede Local de Computadores possui uma taxa de transmissão de 10 [Mbps]. O tempo de propagação na rede é de 12 [μ s]. Os pacotes transmitidos tem comprimento constante e igual a 4000 bits. A técnica de múltiplo acesso utilizada é a CSMA-CD. Para esta rede, a máxima vazão é $S_{\max} = 0.838$, e o atraso médio de transferência de pacote para $\rho = 0.5$ é $E(T) = 946$ [μ s]. Se o tempo de propagação na rede aumentar em 5 vezes, a máxima vazão cai para $S_{\max} = 0.509$ e o atraso de transferência de pacote, para as mesmas condições de carga, sobe para 23.36 [ms]. Os resultados mostram a queda acentuada de desempenho do CSMA-CD com o aumento do tempo de propagação normalizado na rede, indicando uma limitação para o uso do protocolo em redes mais velozes ou onde distância maiores que o ambiente das redes locais estão envolvidas.

EXEMPLO 5: Uma rede utilizando *roll-call polling* como técnica de acesso possui 100 estações secundárias ligadas a uma estação primária segundo uma topologia em estrela. A taxa de transmissão na rede é de 512 kbps. Os pacotes possuem tamanho fixo igual a 4000 bits. A mensagem de *polling* possui 8 bytes. Quando uma estação secundária não tem dados a transmitir ela responde com uma mensagem de controle com 8 bits de comprimento. O tempo de propagação entre qualquer estação secundária e a estação primária é de 60 [μ s]. O *walk time* nesta rede é de 0.26 [ms], resultando nos seguintes atrasos de transferência de pacote, em função da utilização:

ρ	$E\{T\}$
0.1	1.45
0.5	2.60
0.9	12.93

Se o tempo de propagação na rede fosse de 250 [ms], para as mesmas 100 estações, os novos valores de atraso seriam:

ρ	$E\{T\}$
0.1	55.52
0.5	99.53
0.9	499.69

Este resultado mostra que a técnica de *polling* não é adequada em redes com tempo de propagação elevado, como as redes de comunicação por satélite.

Se o número de estações na rede fosse de 1000, com tempo de propagação de 60 [μ s], os atrasos de transferência seriam:

ρ	$E\{T\}$
0.1	14.45
0.5	26.0
0.9	129.9

Mostrando que o desempenho da rede cai com o aumento do número de estações.

EXEMPLO 6: Uma rede local de computadores opera a uma taxa de 10 Mbps. O número de estações na rede é igual a 100, e a latência de cada estação é igual a 1 bit. As estações estão igualmente espaçadas, e o tempo de propagação entre estações adjacentes é de 2 [μ s]. Os pacotes transmitidos na rede possuem tamanho fixo igual a 4000 bits. A tabela a seguir mostra a máxima vazão e o atraso médio para $S = 0.5$, obtidos em cada uma das três formas de implementação da técnica de passagem de ficha.

Técnica	Vazão Máxima	Atraso de transferência [μ s]
Pacote único	0.656	1920
Ficha única	1	913
Múltiplas fichas	1	913

Para um tempo de propagação entre as estações de 200 [μ s], a latência total normalizada do anel é $y = 50.025$, e a máxima vazão obtida é:

Técnica	Vazão Máxima
Pacote único	0.0196
Ficha única	0.02
Múltiplas fichas	1

Para uma vazão $S = 0.5$, só é possível a operação com múltiplas fichas, e o atraso de transferência é de 0.03 [s], 33 vezes maior que o anterior.

EXEMPLO 7: Uma rede FDDI com 100 estações possui uma latência de 0.3 ms. O valor de TTRT para esta rede é de 50 ms. A taxa de transmissão é de 100 Mbps e os pacotes possuem comprimento fixo igual a 10.000 bits. A máxima vazão na rede é de 0.994, e o tempo médio de espera para transmissão, para as cargas de 0.1, 0.5 e 0.9, é 88.92, 201.1 e 1278.6 [μ s].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Abramson77] - Abramson, Norman - The Throughput of Packet Broadcasting Channels. IEEE Transactions on Communications, January 1977, Vol. 25 No 1, pp. 117-128.

[Abramson92] - Abramson, Norman - Fundamentals of Packet Multiple Access for Satellite Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, February 1992, Vol. 10 No 2, pp. 309 - 316.

[Abramson94] - Abramson, Norman - Multiple Access in Wireless Digital Networks. Proceedings of the IEEE, September 1994, Vol. 82 No 9, pp. 1360-1370.

[Albert94] - Albert, Bernhard and Jayasumana, Anura P. - FDDI and FDDI-II, Architecture, Protocols, and Performance. Artech House, Boston, 1994.

[AMD98] - The Wireless Local Loop Revolution. International Engineering Consortium, Jan, 1998. Documento disponível na página www.webproforum.com/amd/topic01.html.

[Balagangadhar79] - Balagangadhar, Muralidhar M. and Pickholtz, Raymond L. - Analysis of a Reservation Multiple Access Technique for Data Transmission Via Satellites. IEEE Transactions on Communications, October 1979, Vol. 27 No 10, pp. 1467-1475.

[Bernardini98] - BERNARDINI, José Luiz e MENEZES, Marla Cristina Matos de - Utilização do GSM em Sistemas WLL. Trabalho de conclusão do curso de especialização em Engenharia de Sistemas de Telecomunicações. Instituto Nacional de Telecomunicações, INATEL, Maio de 1998.

[Bharghavan94] - Bharghavan, Vaduvur et ali - MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's. Proceedings SIGCOMM'94 Conference, ACM, pp 212-225, 1994.

[Bux81] - Bux, Werner - Local-Area Subnetworks: A Performance Comparison. IEEE Transactions on Communications, October 1981, Vol. 29 No 10, pp 1465-1473.

[Bux84] - Bux, Werner - Performance Issues in Local-area Networks. IBM Systems Journal, Vol. 23 No 4, 1984, pp 351- 374.

[Bux89] - Bux, Werner - Token-Ring Local Area Networks and their Performance. Proceedings of the IEEE, February 1989, Vol. 77 No 2, pp 238-256.

[Calhoun92] - Calhoun, George - Wireless Access and the Local Telephone Network. Artech House, Boston, 1992.

[Chakraborty88] - Chakraborty, D. - VSAT Communications Networks - An Overview. IEEE Communications Magazine, May 1988, Vol. 26 No 5, pp 10 - 24.

[Chen94] - Chen, Kwang-Cheng - Medium Access Control of Wireless LANs for Mobile Computing. IEEE Network Magazine, September/October 1994, Vol. 8 No 5. Disponível em www.ieee.org/comsoc/chen.html.

[Comsys98] - VSAT Statistics - The VSAT Report. COMSYS. Disponível em www.comsys.co.uk/vsatstat.html

[Crow96] - Crow, Brian P. - Performance Evaluation of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol. Master Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona, 1996.

[Falconer95] - Falconer, David D. et ali - Time Division Multiple Access Methods for Wireless Personal Communications. IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 50-57.

[Garg96] - Garg, Vijay K. and Wilkes, Joseph E. - Wireless and Personal Communications Systems. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 1996.

[Garg96b] - Garg, Vijay K. and Sneed E. L. - Digital Wireless Local Loop System. IEEE Communications Magazine, October 1996, pp.112-115.

[Garret91] - Garret, Mark W. and Li, San-Qi - A Study of Slot Reuse in Dual Bus Multiple Access Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, February 1991, Vol. 9 No 2, pp. 248-256.

[Ghani91] - Ghani, Sayeed and Schwartz, Mischa - Comparison of DQDB and FDDI MAC Protocols. Proceedings of Conference Local Computer Networks, IEEE, 1991 - pp. 84-95.

[Gilhousen91] - Gilhousen, Klein S. et ali - On the Capacity of a Cellular CDMA System. IEEE Transactions on Vehicular Technology, May 1991, Vol. 40 No 2, pp. 303-312.

[Goodman89] - Goodman, David J. et ali - Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications. IEEE Transactions on Communications, August 1989, Vol. 37 No 8, pp. 885-890.

[Goodman90] - Goodman, David J. - Cellular Packet Communications. IEEE Transactions on Communications, August 1990, Vol. 38 No 8, pp. 1272-1280.

[Goodman91] - Goodman, David J. and Wei, Sherry X. - Efficiency of Packet Reservation Multiple Access. IEEE Transactions on Vehicular Technology, February 91, Vol. 40 No 1, pp. 170-176.

[Hammond86] - Hammond, Joseph L. and O'Reilly, Peter J.P. - Performance Analysis of Local Computer Networks. Addison Wesley Publishing Company. Reading, 1986.

[Hui84] - Hui, Joseph Y. N. - Throughput Analysis for Code Division Multiple Access of the Spread Spectrum Channel. IEEE Journal on Selected Areas Communication, July 1984, Vol. 2 No 4, pp. 482-486.

[Keiser89] - Keiser, Gerd E. - Local Area Networks. McGraw-Hill, New York, 1989.

[Kleinrock75] - Kleinrock, Leonard - Queueing Systems, Volume 1: Theory. John Wiley & Sons, New York, 1975.

[Kleinrock75b] - Kleinrock, Leonard and Tobagi, Fouad A. - Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics. IEEE Transactions on Communications, December 1975, Vol. 23 No 12, pp 1400-1416.

[Kohno95] - Kohno, Ryuji et al - Spread Spectrum Access Methods for Wireless Communications. IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 58-67.

[Kubbar97] - Kubbar, Osama & Mouftah, Hussein T. - Multiple Access Control Protocols for Wireless ATM: Problems Definition and Design Objectives. IEEE Communications Magazine, November 1997, Vol. 35 No 11, pp. 93-99.

[Kwak95] - Kwak, Kyung S. and Lim, Kwang Jae - A Modified PDAMA Protocol for Mobile Satellite Communication Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, February 1995, Vol. 13 No 2, pp. 431-438.

[Laarhuis95] - Laarhuis, Jan Herman - Multichannel Interconnection in All-Optical Networks. PhD Thesis. Universiteit Twente, Enschede, The Netherlands. September 1995.

[Labioud98] - Labioud, Houda - A Radio SS-CS-AAL5 Error Control Scheme for Personal Communication Networks. Proceedings of ICT'98, pp. 27-31, Porto Carras, Greece, 21-25 June 1998.

[Lam79] - Lam, Simon S. - Satellite Packet Communication - Multiple Access Protocols and Performance. IEEE Transactions on Communications, October 1979, Vol. 27 No 10, pp. 1456-1466.

[LaMaire96] - LaMaire, Richard O. et al - Wireless LANs and Mobile Networking: Standards and Future Directions. IEEE Communications Magazine, August 1996, pp 86,94.

[Lee98] - Lee, David and Xu, Ce - Wireless Local Loop vs. Mobile Communication Capacity in CDMA System. Proceedings of International Conference on Telecommunications, Porto Carras, Greece, 21-25 June 1998, pp. 217-220.

[Limb84] – Limb, John O. – Performance of Local Area Networks at High Speed. IEEE Communications Magazine, August 1984, Vol. 22 No 8, pp. 41-45.

[Mahmoud96] - Mahmoud, Ashraf et ali - A Multiple Access Scheme for Wireless Access to a Broadband ATM LAN Based on Polling and Sectored Antennas. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, May 1996, Vol. 14 No 4, pp. 596-608

[Meira98] - Meira, Delson et ali - WLL Field Trials in Brazil. Proceedings of ITS'98 (International Telecommunication Symposium), Sao Paulo, Brasil, 09 a 13 de agosto de 1998, pp. 394-399.

[Miller98] - Miller, Barry - Satellites Free the Mobile Phone. IEEE Spectrum, March 1998, Vol. 35 No 3, pp. 26-35.

[Mokhtar98] - Mokhtar, Ahmed and Azizoglu, Murat - Adaptative Wavelength Routing in All-Optical Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, April 1998, Vol.6 No 2, pp 197,206.

[Monsen95] - Monsen, Peter - Multiple-Access Capacity in Mobile User Satellite Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, February 1995, Vol. 13 No 2, pp. 222-231.

[Newman88] - Newman, R.M. & Budrikis, Z.L. & Hullet, J.L. - The QPSX Man. IEEE Communications Magazine, April 1988, Vol. 26 No. 4, pp. 20-28.

[Pach93] - Pach, Andrzej R. et ali - Slot Pre-Using in IEEE 802.6 Metropolitan Area Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Occtober 1993, Vol. 11 No 8, pp. 1249,1258.

[Padgett95] - Padgett, Jay E. et ali - Overview of Wireless Personal Communications. IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 28-41.

[Pahlavan97] - Pahlavan, Kaveh et ali - Wideband Local Access: Wireless LAN and Wireless ATM. IEEE Communications Magazine, November 1997, Vol. 35 No 11, pp. 34-40.

[Passas97] - Passas, Nikos et ali - Quality-of-Service-Oriented Medium Access Control for Wireless ATM Networks. IEEE Communications Magazine, November 1997, Vol. 35 No 11, pp. 42-50.

[Peyrav96] - Peyrav, Hassan - Multiple Access Control (MAC) Protocols for the Mars Regional Network. Technical Report, Department of Mathematics and Computer Science, Kent State University, Kent, Ohio. Prepared for: National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio. Available at <http://mars.fc.mcs.kent.edu/mac/mac.html>.

[Pickholtz82] - Pickholtz, Raymond L. - Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial. IEEE Transactions on Communications, May 1982, VOL. 30 No 5, pp. 855-884.

[Pickholtz91] - Pickholtz, Raymond L. et ali - Spread Spectrum for Mobile Communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, May 1991, Vol. 40 No 2, pp. 313-322.

[Qiu96] - Qiu, Xiaoxin and Li, Victor O. K. - On the Capacity of Packet Reservation Multiple Access with Capture in Personal Communication Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, November 1996, Vol. 45 No 4, pp. 666-675.

[Raith91] - Raith, Krister and Uddenfeldt, Jan - Capacity of Digital Cellular TDMA Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, May 1991, Vol. 40 No 2, pp. 323-332.

[Raychaudhuri87] - Raychaudhuri, D. - Stability, Throughput, and Delay of Asynchronous Selective Reject Aloha. IEEE Transactions on Communications, July 1987, Vol. 35 No 7, pp. 767-772.

[Raychaudhuri88] - Raychaudhuri, D. and Joseph, K. - Channel Access Protocols for Ku-band VSAT Networks: A Comparative Evaluation. IEEE Communications Magazine, May 1988, Vol. 26 No 5, pp 34-44.

[Saadawi94] - Saadawi, Tarek N. et ali - Fundamentals of Telecommunications Networks. John Wiley & Sons, New York, 1994.

[Sachs88] - Sachs, Sonia R. - Alternative Local Area Network Access Protocols. IEEE Communications Magazine, March 1988, Vol. 26 No 3, pp. 25-45.

[Schwartz77] - Schwartz, Mischa - Computer-Communication Network: Design and Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1977.

[Schwartz87] - Schwartz, Mischa - Telecommunication Networks, Protocols, Modeling and Analysis. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1987.

[Shannon48] - Shannon, C. E. - A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, Vol. 27, 1948, pp. 379-423, 623-657.

[Sklar88] - Sklar, Bernard - Digital Communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1988.

[Sloan91] - Sloan, J. and Drinan, A. - The IEEE 802.6 Metropolitan Area Network Distributed-Queue, Dual-Bus Protocol. Handbook of Local Area Network, Auerbach Publishers, 1991.

- [Sohraby87] - Sohraby, Khosrow; Molle, Mart L.; and Venetsanopoulos, Anastasios N. - Comments on "Throughput Analysis for Persistent CSMA Systems". IEEE Transactions on Communications, February 1987, Vol. 35 No 2, pp. 240-243.
- [Takagi85] - Takagi, Hideaki and Kleinrock, Leonard - Throughput Analysis for Persistent CSMA Systems. IEEE Transactions on Communications, July 1985, Vol. 33 No 7, pp. 627-638.
- [Takagi87] - Takagi, Hideaki and Kleinrock, Leonard - Correction to "Throughput Analysis for Persistent CSMA Systems". IEEE Transactions on Communications, February 1987, Vol. 35 No 2, pp. 243-245.
- [Tobagi80] - Tobagi, Fouad A. - Multiaccess Protocols in Packet Communication Systems. IEEE Transactions on Communications, April 1980, Vol. 28 No 4, pp. 468-488.
- [Tobagi84] - Tobagi, Fouad A. et ali - Packet Radio and Satellite Networks. IEEE Communications Magazine, November 1984, Vol. 22 No 11, pp. 24-40
- [Webb98] - Webb, William - Introduction to Wireless Local Loop. Artech House, Boston, 1998.
- [Weber81] - Weber, Charles L. et ali - Performance Considerations of Code Division Multiple-Access Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, February 1981, Vol. 30 No 1, pp. 3-10.
- [Weinmiller] - Weinmiller, Jost et ali - Performance Study of Access Control in Wireless LANs - IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HIPERLAN. Technical Report, Technical University Berlin.
- [Wu94] - Wu, William W. et ali - Mobile Satellite Communications. Proceedings of the IEEE, September 1994, Vol. 82 No 9, pp. 1431-1448.