

**ROLF MERTENS JUNIOR**

**UMA FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO DE  
DESEMPENHO DO PROTOCOLO TCP EM ENLACES  
DE RÁDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática Aplicada.

Área de Concentração:  
Sistemas Distribuídos

Orientador: Prof. Dr. Marcelo E. Pellenz

Curitiba  
2004

Mertens, Rolf Junior

UMA FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO TCP EM ENLACES DE RÁDIO, Curitiba, agosto 2004. 87 pg

Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada.

1. Redes sem fio 2. Análise de Desempenho 3. Enlace de Rádio 4. Protocolos. I. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada II-t

À minha esposa Eliane,  
aos meus irmãos, cunhados  
e sobrinhos.

## **Agradecimentos**

À minha noiva Eliane e à minha família, pelo incentivo e compreensão durante todo o período em que me dediquei à realização deste trabalho.

Ao professor e orientador Dr. Marcelo Eduardo Pellenz pela orientação, compreensão e, principalmente, dedicação apresentada ao longo dos estudos para o desenvolvimento da dissertação.

Aos colegas da Divisão de Suporte Técnico do Tribunal de Justiça do Paraná, em especial aos colegas Carlos Bruno Fischer, Douglas Henrique Villatora e Carlos René dos Santos Bascuñán, que além do constante incentivo e apoio, auxiliaram com informações técnicas para o desenvolvimento da ferramenta de simulação e para realização deste trabalho.

Agradeço também a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.

# Sumário

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Sumário</b> .....	<b>ii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>vi</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>vii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>viii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Desafio .....	2
1.2. Motivação .....	3
1.3. Proposta .....	3
1.4. Contribuição .....	4
1.5. Organização .....	4
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Fundamentos Básicos</b> .....	<b>6</b>
2.1. Protocolo de Enlace de Rádio .....	6
2.1.1. Detecção e Correção de Erros .....	7
2.2. Descrição do Protocolo TCP .....	9
2.2.1. Serviço de Controle de Transmissão Confiável .....	12
2.2.2. Serviço de Controle de Fluxo de Dados .....	14
2.2.3. Mecanismos de Controle de Congestionamento .....	15
2.2.3.1. Descrição do Procedimento de <i>Início Lento</i> .....	15
2.2.3.2. Descrição do Procedimento de <i>Colapso de Congestionamento</i> .....	16
2.3. Desempenho do Protocolo TCP em Enlaces de Rádio .....	16
2.3.1. Protocolo TCP com Altas Taxas de Erro no Canal de Rádio .....	16
2.3.2. Protocolo TCP com Baixa Taxa de Transmissão .....	17
2.4. Conclusão .....	18

<b>Capítulo 3</b>	
<b>Modelos Discretos de Canais de Rádio .....</b>	<b>19</b>
3.1. Introdução .....	19
3.2. Modelo Discreto de Canal sem Memória.....	21
3.3. Modelo Discreto de Canal com Memória .....	21
3.4. Modelo do Canal para Surtos de Erro .....	24
3.5. Conclusão .....	25
<b>Capítulo 4</b>	
<b>Ferramenta de Simulação para Análise de Desempenho .....</b>	<b>26</b>
4.1. Introdução .....	26
4.2. Descrição Geral da Ferramenta de Simulação .....	27
4.3. Descrição da Camada de Enlace .....	30
4.3.1. Procedimento de Controle de Retransmissões.....	31
4.3.2. Procedimento de Controle de Recepção dos Quadros .....	33
4.4. Descrição da Camada do Protocolo TCP no Simulador .....	34
4.4.1. Controle de Congestionamento.....	36
4.4.2. Descrição do Mecanismo de Funcionamento da Janela Deslizante.....	36
4.4.3. Métodos de Controle de Erro Utilizando Esquema ARQ.....	37
4.4.4. Controle de Retransmissão Gerenciadas pelo <i>Timeout</i> .....	39
<b>Capítulo 5</b>	
<b>Estudo de Caso.....</b>	<b>41</b>
5.1. Introdução .....	41
5.2. Análise de Desempenho da Camada do Protocolo RLP .....	44
5.2.1. Análise da Probabilidade de Erro do Quadro .....	44
5.2.2. Análise da Vazão de Dados RLP .....	48
5.2.3. Análise do Atraso Médio dos Quadros RLP.....	51
5.3. Análise de Desempenho da Camada TCP.....	53
5.3.1. Análise da Vazão de Dados TCP .....	54
5.3.1.1. Implicação do Número de Retransmissões da Camada RLP .....	55
5.3.1.2. Implicações dos Modelos de Esquemas ARQ no Desempenho do TCP .....	57
5.3.1.3. Influência no Tamanho do Segmento TCP .....	61
5.3.2. Análise do Atraso Médio dos Pacotes TCP .....	63
5.3.3. Análise da Probabilidade de Erro .....	65
5.4. Conclusão .....	67
<b>Conclusão .....</b>	<b>69</b>

## Lista de Figuras

Figura 2-1: Modelo da camada de enlace de dados .....	9
Figura 2-2: Modelo de Referência OSI .....	9
Figura 2-3: Sincronização de comunicação .....	11
Figura 2-4 Exemplo de transmissão com confirmação positiva (ACK) .....	12
Figura 2-5: Modelo de detecção de erros por temporizador .....	13
Figura 2-6 - Exemplo de transmissão com ACK duplicados.....	13
Figura 2-7: Modelo de transmissão de três pacotes com protocolo de janelas deslizantes.....	14
Figura 3-1: Canal binário simétrico.....	21
Figura 3-2: Cadeia de Markov de dois estados.....	22
Figura 4-1 – Modelo genérico de transmissão fim a fim.....	29
Figura 4-2: Modelo genérico do processo de transmissão da camada de enlace .....	31
Figura 4-3: Controle de retransmissões controladas por timeout .....	32
Figura 4-4: Modelo de janelas deslizantes com $(W_{\min})$ 01 e $(W_{\max})$ 04 .....	37
Figura 5-1: Modelo simples de transferência de dados TCP/RLP.....	42
Figura 5-2: Estrutura de protocolos do CDMA IS-95 .....	43
Figura 5-3: Probabilidade de erro do quadro RLP no modelo do canal equiprovável.....	46
Figura 5-4: Probabilidade de erro do quadro RLP no modelo do canal com surtos de erro .....	46
Figura 5-5: Quantidade de quadros descartados no modelo do canal equiprovável.....	47
Figura 5-6: Quantidade de quadros descartados no modelo do com surtos de erro.....	47
Figura 5-7: Vazão de dados no modelo equiprovável .....	50
Figura 5-8: Vazão de dados no modelo de surto de erros.....	50
Figura 5-9: Atraso médio dos quadros no modelo do canal equiprovável.....	52
Figura 5-10: Atraso médio dos quadros no modelo do canal com surtos de surto .....	53
Figura 5-11: Quadro do protocolo RLP.....	55
Figura 5-12: Modelo do canal equiprovável e controle de erro <i>Stop-and-Wait</i> .....	56
Figura 5-13: Modelo do canal com surto de erros e controle de erro <i>Stop-and-Wait</i> .....	57
Figura 5-14: Modelo do canal equiprovável para $(W_{\min} = 1)$ e $(W_{\max} = 4)$ .....	58
Figura 5-15: Modelo de canal com surto de erro para $(W_{\min} = 1)$ e $(W_{\max} = 4)$ .....	59
Figura 5-16: Modelo do canal equiprovável para $(W_{\min} = 2)$ e $(W_{\max} = 8)$ .....	60
Figura 5-17: Modelo de canal com surto de erros para $(W_{\min} = 2)$ e $(W_{\max} = 8)$ .....	61
Figura 5-18: Selective Repeat com MSS=536 e MSS=1072.....	62
Figura 5-19: Selective Repeat com MSS=536 e MSS=1072.....	63
Figura 5-20: Atraso médio TCP no modelo de canal equiprovável.....	64
Figura 5-21: Atraso médio TCP no modelo de canal com surtos de erro.....	65
Figura 5-22: Probabilidade de erro do segmento TCP no modelo de canal equiprovável.....	66
Figura 5-23: Probabilidade de erro do segmento TCP no modelo de canal com surtos de erro .....	67

# Lista de Tabelas

Tabela 1: Exemplo da paridade de caracteres par.....	8
Tabela 2: Exemplo de paridade de caracteres ímpar .....	8
Tabela 3: Procedimento a ser adotado para cada quadro recebido .....	34



## Lista de Símbolos

$S_t$	estado do canal durante transmissão do quadro
$F$	margem do desvanecimento do sinal
$f_d$	freqüência Doppler
$T$	período de amostragem do canal
$P_E$	média da taxa de erro do quadro
$i$	número do quadro
$m$	parâmetro usado para modelar a velocidade da estação móvel
$F_t$	quantidade total de quadros transmitidos no intervalo de tempo
$I_q$	tempo de transmissão de cada quadro
$T_{bps}$	taxa máxima de transmissão em bits por segundo
$T_q$	quantidade de bits máximo transmitidos em cada quadro da camada de enlace
$R$	quantidade necessária de quadros para transportar um segmento TCP
$(W_{\max})$	tamanho máximo da janela anunciada anunciada pelo receptor
$(W_{\min})$	tamanho mínimo da janela deslizante anunciada pelo receptor
$T_{inicial}$	tempo do início da transmissão do segmento TCP
$T_{final}$	tempo final da transmissão do segmento TCP
$Err$	diferença entre o último valor medido e a estimativa corrente
$A$	estimativa média do $RTT$
$D$	desvio padrão atenuado
$V_{rlp}$	quantidade de bits recebidos em uma determinada fração de tempo
$R_{rlp}$	quantidade de quadros recebidos com sucesso pela camada do protocolo RLP
$T_{rlp}$	tempo total de transmissão dos quadros
$P_{rlp}$	probabilidade de erro do quadro
$A_q$	quantidade de quadros RLP abortados
$T_q$	total de quadros transmitidos
$V_{tcp}$	quantidade de bits recebidos por segundo
$R_{tcp}$	quantidade de segmentos TCP recebidos
$O_{rlp}$	quantidade de bits destinado ao cabeçalho do quadro RLP
$P_{tcp}$	probabilidade de erro do segmento TCP
$E_{tcp}$	quantidade de segmentos TCP descartados
$T_{tcp}$	quantidade total de segmentos transmitidos
$V(N)$	número do quadro mais antigo faltante
$V(S)$	número de seqüência do próximo quadro a ser transmitido
$V(R)$	número de seqüência do próximo quadro esperado
$n$	número máximo de retransmissões da camada de enlace

## Lista de Abreviaturas

ACK	Acknowledgment
ARQ	Automático-Repeat-Request
CDMA	Code Division Multiple Access
DS	Direct Sequence
EIA	Electronic Industries Association
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FER	Frame Error Rate
FH	Frequency Hopping
GSM	Global System for Mobile Communication
GPRS	General Packet Radio Service
ICMP	Internet Control Message Protocol
IP	Internet Protocol
MSS	Maximum Segment Size
NAK	Negative Acknowledgment
NS	Network Simulator
OSI	Open System Interconnection
PMRM	Power Measurement Report Message
PPP	Point-to-Point Protocol
RLP	Radio Link Protocol
RTO	Retransmission Time Out
RTT	Round Trip Time
TIA	Telecommunications Industry Association
TCP	Transport Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access

## Resumo

Prover serviços de acesso via enlaces de rádio com desempenho comparado à redes cabeadas é essencial para o futuro das redes *wireless*, principalmente no que tange a acessos à Internet. O protocolo padrão de transporte utilizado pela maioria das aplicações da Internet é o TCP/IP (*Transport Control Protocol/Internet Protocol*). Este protocolo, originalmente concebido para trabalhar em redes cabeadas onde a principal causa para perda de pacotes é o congestionamento da rede, tem o seu desempenho severamente afetado quando utilizado em canais de rádio onde a probabilidade da taxa de erro é maior comparada as redes cabeadas. Neste trabalho é proposta uma ferramenta para simulação de desempenho do protocolo TCP/IP em redes sem fio. A ferramenta para simulação divide-se em três camadas: modelo do canal de rádio a ser utilizado na transmissão (camada física), camada de enlace de dados empregando-se todas as suas funcionalidades de controle de erros e a camada de transporte, provendo controle confiável de entrega de pacotes, controle de fluxo e congestionamento. É realizado um estudo de caso, utilizando-se, no processo de simulação do sistema, os parâmetros do CDMA IS-95. A ferramenta para simulação possibilita avaliar a interação de desempenho entre as camadas, com o objetivo de verificar o comportamento do canal de rádio a fim de otimizar o desempenho geral do sistema.

**Palavras-Chaves:** TCP, Canal de Rádio, Camada de Enlace, Protocolo

## Abstract

In order to provide access services through wireless networks with comparable performance to wired networks is essential for the future of the wireless networks, mainly in that it refers to the accesses to the Internet. The standard protocol of transport used by most of the applications of the Internet is the TCP/IP (Transport Control Protocol/Internet Protocol). This protocol, originally conceived to work in wired network where the main cause for loss of packages is the congestion of the network, has its acting severely affected when used in channels of radio where the probability of the mistake rate is larger compared the wired network. In this work, a tool is proposed for simulation of acting of the protocol TCP/IP in network wireless. The tool for simulation divides in three layers: model of the channel of radio to be used in the transmission (physical layer), layer of connection of data being used whole its functionalities of control of mistakes and the transport layer, providing reliable control of delivery of packages, flow control and congestion. A case study is accomplished, being used, in the process of simulation of the system, the parameters of CDMA IS-95. The tool for simulation facilitates to evaluate the acting interaction among the layers, with the objective of verifying the behavior of the channel of radio in order to optimize the general performance of the system.

**Keywords:** TCP, Channel of Radio, Layer of Enlace, Protocol.

# Capítulo 1

## Introdução

Devido ao rápido avanço na área da comunicação sem fio e à crescente necessidade no aumento do desempenho em aplicações, o estudo e avaliação dos protocolos que compõem uma rede sem fio tem sido amplamente impulsionado pela necessidade da utilização de sistemas 2.5G/3G. Um dos objetivos mais importantes é o de permitir serviços de comunicação em enlaces sem fio na Internet, provendo um desempenho próximo ao empregado em redes cabeadas. A Internet está baseada na arquitetura TCP/IP (do inglês: *Transport Control Protocol/Internet Protocol*), sendo o e-mail, ftp, telnet e a navegação as aplicações mais utilizadas.

Contudo, o desempenho do protocolo TCP é severamente afetado quando implementado diretamente em enlaces de rádio, onde a taxa de erro do canal é muito alta. Por esta razão, diversos mecanismos e implementações são propostas com o objetivo de minimizar esse impacto, de modo a permitir uma transmissão mais eficiente.

Dentre os fatores que têm influência no desempenho do sistema sem fio, podemos destacar o modelo do canal de rádio, onde sua condição física poderá gerar uma elevada quantidade de erros no canal e prejudicar o desempenho do sistema. Outro fator que influencia no desempenho do sistema é o mecanismo de implementação no controle de transmissão na camada de enlace, que tem como principal função proporcionar mecanismos para controle e detecção de erros gerados pela camada física. Outra camada que tem alta influência no desempenho do sistema é a camada de transporte, que tem por função principal garantir uma entrega confiável e ordenada dos dados. Também proporciona um controle de fluxo de dados fim a fim na conexão e mantém o controle de congestionamento da rede, garantindo que pontos intermediários na conexão não interfiram no desempenho do sistema, diminuindo desta forma o número retransmissões desnecessárias dos segmentos TCP.

Com o objetivo de avaliação do desempenho do protocolo TCP em enlaces sem fio, a fim de proporcionar uma análise apurada da interferência causada pela camada física em redes de enlace de rádio, elaborou-se uma ferramenta de simulação, onde através da análise de resultados obtidos em simulações, obtenham-se as melhores estratégias de parametrização tanto na camada de enlace quanto na de transporte, com o objetivo de melhorar a interação entre as camadas que compõem o sistema.

### **1.1.Desafio**

Devido a sua complexidade e tendo em vista a dificuldade para análise do desempenho na transmissão fim a fim do protocolo TCP, os resultados obtidos de forma analítica nem sempre são possíveis e quando são, exige-se muito tempo para obtê-los. Desta forma, a utilização de ferramenta para simulação é mais indicada para a avaliação do desempenho com vasta variação na parametrização do sistema.

Atualmente existem no mercado alguns softwares com funcionalidades de simulação do protocolo TCP em enlaces de rádio, sendo alguns produtos comerciais e outros disponíveis gratuitamente, mantidos por comunidades de software livre. Entre eles, podemos citar o NS-2 (*Network Simulator*) [NET02], sendo este um software distribuído gratuitamente na Internet, largamente utilizado tanto pela comunidade acadêmica quanto por profissionais da área de comunicação de dados, sendo utilizado para simulações de diversas topologias de rede, tendo uma grande credibilidade e aceitação de todos.

Devido à dificuldade na parametrização dessas ferramentas para simulação, principalmente para casos específicos, como por exemplo, a simulação do protocolo TCP em redes CDMA IS-95, propõe-se a elaboração de uma ferramenta de simulação para a apuração de resultados. Através dela permite-se a alteração de diversos parâmetros que afetam o desempenho geral do sistema, como modelo do canal de rádio, estratégia de detecção e correção de erro na camada de enlace e simulação das principais funcionalidades do protocolo TCP.

Com a utilização da ferramenta para simulação, desenvolvida especialmente para a análise do desempenho da comunicação em enlaces de rádio, pode-se, de maneira mais simplificada, estimar a vazão de dados do protocolo TCP em canais *wireless*, atraso médio e a taxa de perda dos pacotes.

## **1.2.Motivação**

Devido ao rápido crescimento e avanço das tecnologias, principalmente no que tange à mobilidade, tem-se o TCP/IP como principal protocolo que proporciona a conectividade global. Tornou-se também o padrão para comunicação sem fio, onde o principal motivador na utilização desse protocolo em redes de enlaces de rádio é a facilidade da convergência entre as redes cabeadas e as redes celulares, principalmente nas de próxima geração 2.5G/3G.

A especificação e desenvolvimento do protocolo TCP foi voltado às redes cabeadas, e as diversas melhorias ao longo dos anos objetivando aumentar seu desempenho também para redes cabeadas, onde as taxas de erro no canal são muito baixas e o congestionamento da rede é a principal causa da perda de pacotes. O desempenho do protocolo TCP, quando aplicado diretamente na comunicação de enlaces de rádio, tende ser severamente afetado, pois a taxa de erro de quadro (do inglês: Frame Error Rate - FER) é significativamente maior quando comparada às redes cabeadas.

Para reduzir a FER vista pela camada de transporte (protocolo TCP), neste trabalho são propostos diversos mecanismos que permitirão uma redução na taxa de erro do quadro, evitando dessa forma que o desempenho do protocolo TCP seja afetado.

Através de resultados obtidos em simulações, podemos definir quais as melhores estratégias a serem adotadas no processo de transmissão e controle de fluxo empregado em cada camada, sob variadas condições de operação no canal físico, objetivando determinar quais os melhores parâmetros a serem utilizados pelo sistema, para uma melhor interação entre as camadas, a fim de se conseguir um aumento do desempenho geral do sistema da comunicação sem fio.

## **1.3.Proposta**

Neste trabalho é proposta uma ferramenta para simulação do desempenho do protocolo TCP em enlaces de rádio. Através da ferramenta de simulação conseguir efetuar-se uma análise das melhores variações na parametrização entre as camadas física, enlace e transporte que compõem a ferramenta, possibilitando verificar e obter as melhores estratégias de transmissão para melhorar o desempenho geral do sistema.

A proposta de se desenvolver uma nova ferramenta baseou-se no fato de se desenvolver um mecanismo simples de alteração dos parâmetros que influenciam o desempenho do sistema.

Desta forma, propõem-se o desenvolvimento da ferramenta de simulação de maneira modular, com o funcionamento de 03 (três) camadas principais, sendo elas a camada física, neste caso utilizando-se de enlace de rádio, podendo-se implementar diversos modelos discretos do canal; a camada de enlace e a camada de transporte. Mesmo sendo independentes, a parametrização nas 03 (três) camadas que compõem existe uma forte interação entre elas, onde a busca de um modelo ideal a ser empregado nas camadas de enlace e na camada de transporte, depende do modelo do canal de rádio empregado.

#### **1.4. Contribuição**

É essencial o acesso via enlaces de rádio com desempenho similar à redes cabeadas, principalmente para a utilização de aplicações Internet, que tem o protocolo TCP como padrão de transporte utilizado pela maioria das aplicações. Tendo em vista seu desempenho severamente afetado quando utilizado diretamente em canais de rádio, onde a taxa de erro do quadro é muito superior comparada a rede cabeada, desenvolveu-se uma ferramenta para simulação do desempenho do protocolo TCP em redes sem fio.

Esta ferramenta permitirá que sejam efetuadas simulações em diversas tecnologias diferentes, como por exemplo, CDMA e GSM/GPRS. Para isso, necessita-se alterar na camada física os parâmetros referentes ao modelo do canal de rádio a ser utilizado na transmissão. Outros parâmetros que também podem ser alterados são as estratégias de controle e detecção de erros na camada de enlace de dados e, na camada de transporte, os parâmetros de controle confiável de entrega de pacotes, controle de fluxo e congestionamento da rede.

#### **1.5. Organização**

O trabalho é dividido em 5 (cinco) capítulos, sendo o Capítulo 1 a introdução do trabalho. O capítulo 2 apresenta os fundamentos básicos dos protocolos TCP, da camada de enlace e mais alguns conceitos relevantes que serão utilizados ao longo do trabalho. No capítulo 3 são discutidos os modelos discretos do canal utilizado para a obtenção dos resultados através das simulações. No capítulo 4 é apresentado uma descrição da implementação da ferramenta de simulação e, finalmente, no capítulo 5, através de um estudo de caso, são efetuadas análises de resultados obtidos nas simulações, com a utilização de



diversas estratégias de retransmissão da camada de enlace e diversos mecanismos de controle de erro da camada do protocolo TCP.

## Capítulo 2

### Fundamentos Básicos

Neste capítulo, apresentam-se os principais conceitos da camada de enlace e suas principais funções, abordaremos os conceitos básicos da camada de transporte, com ênfase para o protocolo TCP e suas implicações com relação ao desempenho quando aplicado diretamente em redes sem fio.

#### 2.1. Protocolo de Enlace de Rádio

A camada de enlace de dados tem por função principal a transformação do meio de comunicação, originário das camadas superiores em um meio livre de erros de transmissão para a camada de transporte. Ela efetua esta função através do fracionamento dos pacotes recebidos do emissor em unidades menores de dados, denominados quadros.

Estes quadros são transmitidos seqüencialmente e vão gerar quadros de reconhecimento enviados pelo receptor. Nesta camada, as unidades de dados são enriquecidas com um conjunto de bits adicionais (no início e fim de cada quadro) de modo a permitir o reconhecimento destes.

Um problema típico deste nível é o da ocorrência de interferências sobre o meio de transmissão que provoque a destruição (perda) do quadro enviado, especialmente em ambientes *wireless*. Neste caso, o quadro deve ser retransmitido para garantir a integridade da informação transferida. Por outro lado, deve-se também evitar múltiplas retransmissões de um mesmo quadro, o que pode provocar a sua duplicação.

Uma outra função desta camada é evitar que uma alta taxa de transmissão de dados da parte do emissor seja enviada para o sistema receptor sem que o mesmo possua capacidade de

absorver as informações à mesma taxa. Este mecanismo deve permitir informar ao emissor a necessidade de armazenamento dos dados a transmitir (controle de fluxo).

As principais funções da camada de enlace são:

- a) Estabelecimento e liberação da conexão de enlace sobre conexões físicas ativas;
- b) Divisão da conexão de enlace: desta forma pode haver uma conexão de enlace sobre várias conexões físicas;
- c) Montagem e delimitação de quadros: montagem de quadros a partir de unidades de quadros de serviços provindas das camadas superiores e reconhecimento de quadros a partir da cadeia de bits vinda do nível físico;
- d) Controle de fluxo: controla a taxa de transmissão dos quadros, evitando que o sistema transmissor envie dados a uma taxa maior do que o receptor consegue processar.
- e) Controle de acesso: gerência do acesso ao meio de transmissão;
- f) Controle de erro: a camada de enlace deve detectar erros de transmissão, de formato e de operação devidos à problemas de conexão física ou mau funcionamento da própria camada. Os erros mais comumente detectados são erros devido a perdas, duplicação, não-ordenação e danificação de quadros.
- g) Controle de seqüência: as unidades de dados de serviço de enlace devem ser entregues à entidade de rede de destino na mesma ordem em que são recebidas da entidade de rede de origem;
- h) Gerenciamento: a camada de enlace deve exercer algumas funções de gerenciamento relacionadas à qualidade de serviço prestado, caracterizada por: tempo médio entre erros irrecuperáveis, taxa de erro residual decorrente da alteração, perda, duplicação e não-ordenação dos quadros, disponibilidade do serviço, atraso de trânsito e vazão de dados.

### **2.1.1. Detecção e Correção de Erros**

Em qualquer transmissão de dados existe o risco da ocorrência de erro sob o efeito de perturbações aleatórias ou de ruídos, principalmente no que tange a comunicação sem fio, pois é afetado por efeito de multipercursos de curta duração e por perdas de percurso de larga escala. Basicamente os erros ocorridos na transmissão através da rede sem fio podem ser:

- Erros de bit introduzidos nos dados;
- Perda de quadros ou pacotes;

- Falha no enlace de rádio.

Por esse motivo, a camada de enlace de dados tenta garantir uma transmissão livre de erros, com o objetivo de melhorar o desempenho em uma transmissão *wireless*, podendo ser melhorada com a utilização do uso de esquemas de controle de erro. Dois métodos de controle de erro mais comuns são o FEC (do inglês: Forward Error Correction) e o ARQ. A Figura 2-1 ilustra o mecanismo básico da camada de enlace, utilizando-se os dois métodos mais comuns para detecção e correção de erros.

O método ARQ (do inglês: Automátic-Repeat-Request) também é usado para transferência de dados de forma confiável em comunicações sem fio. O transmissor envia um pacote que consiste em bits de carga e um código para detecção de erro. O receptor verifica a integridade dos dados e uma notificação ACK (do inglês: Acknowledgment) deve ser devolvida ao transmissor.

O outro método, também com a finalidade de melhorar a qualidade da transmissão dos dados no canal é alocar bits excedentes para corrigir o máximo de erros no receptor, técnica comumente referenciada como FEC, mantendo um compromisso com a eficiência da comunicação.

Um dos métodos, entre muitos disponíveis para detecção de erros, podemos citar o paridade de caracteres, que apesar de utilizar um mecanismo simples de detecção de erros, é muito utilizado e eficiente na sua aplicabilidade. Seu funcionamento consiste em usar codificação de 7 bits em bytes de 8 bits, utilizando-se do oitavo bit como sinalizador de paridade, de modo que a quantidade de bits 1 no byte seja par (no caso de paridade par) ou ímpar (no caso de paridade ímpar). Este esquema permite detectar, mas não corrigir erros.

Tabela 1: Exemplo da paridade de caracteres par

Caracter	bit de paridade par	Seqüência a transmitir
1 0 0 0 1 0 0	0	1 0 0 0 1 0 0 <b>0</b>
1 1 1 0 0 0 0	1	1 1 1 0 0 0 0 <b>1</b>

Tabela 2: Exemplo de paridade de caracteres ímpar

Caracter	bit de paridade ímpar	Seqüência a transmitir
1 0 0 0 1 0 0	1	1 0 0 0 1 0 0 <b>1</b>
1 1 1 0 0 0 0	0	1 1 1 0 0 0 0 <b>0</b>

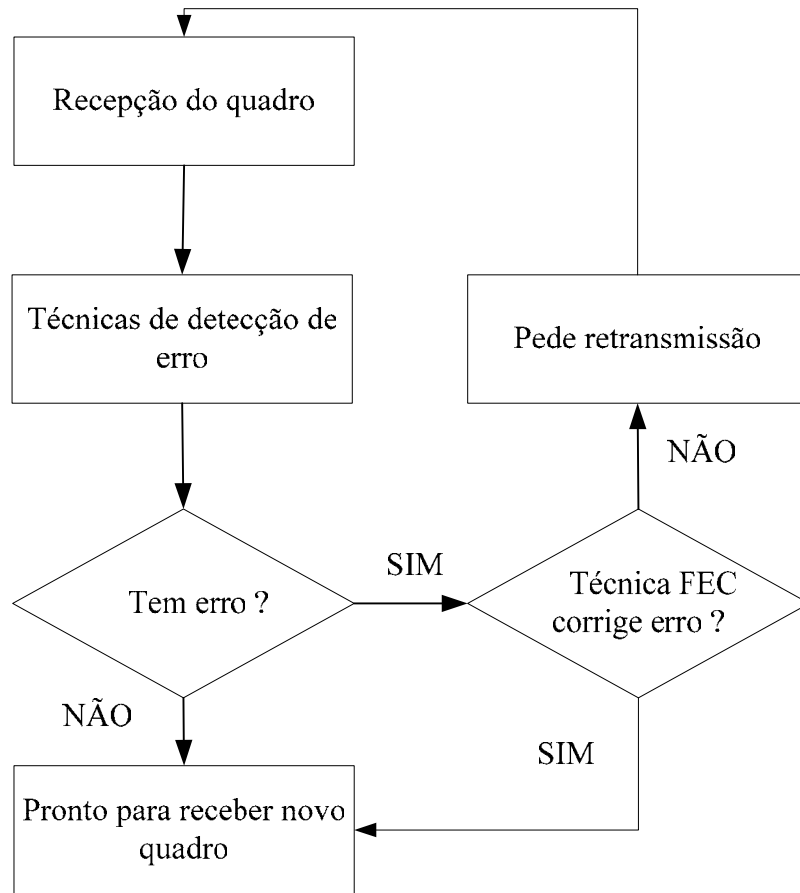


Figura 2-1: Modelo da camada de enlace de dados

## 2.2.Descrição do Protocolo TCP

O protocolo TCP é um protocolo de camada de transporte no modelo de referência OSI, conforme ilustrado na Figura 2-2.

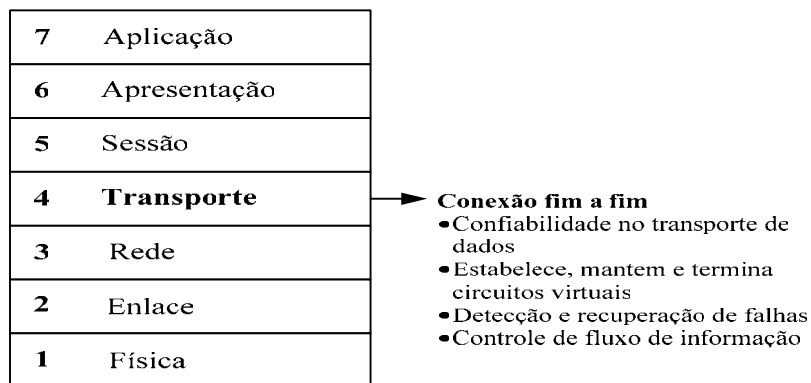


Figura 2-2: Modelo de Referência OSI

Em contrapartida ao modelo de referência OSI, surgiu o modelo TCP/IP, sendo que este modelo tornou-se, por ser mais simples e específico, o padrão da Internet. O modelo TCP/IP enfatiza a máxima flexibilidade na camada de aplicação para desenvolvedores de software.

Além de ser hoje o protocolo mais utilizado e ter se tornado padrão para troca de informações na Internet, o TCP é um protocolo independente e de finalidade geral que pode ser adaptado para utilização com outros sistemas de comunicação. Também pode ser considerado um protocolo complexo, pois foi desenvolvido para oferecer confiabilidade trabalhando com diversos ambientes de rede, nas mais diferentes ferramentas e com os mais variados aplicativos.

Para o TCP, um pacote de dados é uma seqüência de bits dividida em octetos (oito bits). A aplicação fornece ao protocolo de transporte os dados em forma de pacote, e o protocolo é livre para segmentar o pacote na forma que for melhor para a transmissão. Pode-se dizer então que o TCP transporta segmentos de dados.

Os serviços orientados para conexão envolvem três fases. Na fase de estabelecimento da conexão, um único caminho entre a origem e o destino é determinado. Os recursos são normalmente reservados nesse momento para garantir um nível consistente de serviço. Durante a fase de transferência de dados, os dados são transmitidos em seqüência pelo caminho estabelecido, chegando ao destino na ordem em que foram enviados. A fase de encerramento da conexão consiste em encerrar a conexão entre a origem e o destino quando ela não é mais necessária.

A troca de números de seqüência de introdução, durante a seqüência da conexão é importante. Ela garante que dados perdidos, devido a problemas de transmissão, possam ser recuperados.

Primeiro, uma estação inicia uma conexão pelo envio de um pacote indicando seu número de seqüência inicial com um determinado bit no cabeçalho definido para indicar um pedido de conexão. Então, a outra estação recebe o pacote, grava o número de seqüência  $x$ , responde com uma confirmação  $x + 1$  e inclui seu próprio número de seqüência inicial  $y$ . O número de confirmação  $x + 1$  significa que a estação recebeu todos os octetos até  $x$ , inclusive, e que está esperando  $x + 1$  em seguida, conforme Figura 2-3.

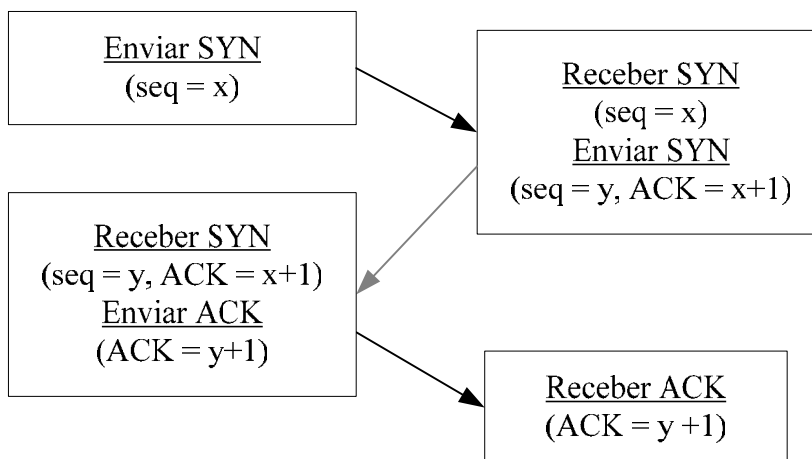


Figura 2-3: Sincronização de comunicação

A confirmação positiva (ACK), é uma técnica comum que muitos protocolos utilizam para fornecer confiabilidade na transmissão. Com o ACK, a origem envia um pacote, aciona um temporizador e espera por uma confirmação antes de enviar o próximo pacote conforme discutido na Seção 2.2.1.

O tamanho da janela determina a quantidade de dados que poderá ser transmitida antes de ser recebida uma confirmação do destino. Quanto maior o tamanho da janela do receptor, maior a quantidade de dados que a estação de origem poderá transmitir sem a necessidade de confirmação de recebimento. Depois que uma estação transmite a quantidade de pacotes da janela dimensionada do receptor, a estação de origem tem de receber uma confirmação de que todos os segmentos foram recebidos antes de poder enviar mais dados. O TCP utiliza um método conhecido como *confirmações de espera*, que significa que o número da confirmação se refere ao segmento que é esperado em seguida. O esquema de janelamento é um mecanismo de controle de fluxo que exige que o dispositivo de origem receba uma confirmação do destino depois de transmitir uma determinada quantidade de dados. Por exemplo, com um tamanho de janela três, o dispositivo de origem pode enviar três segmentos ao destino. Ele deve então aguardar uma confirmação. Se o destino receber os três segmentos, ele enviará uma confirmação ao dispositivo de origem, que poderá então transmitir mais três segmentos. Se, por algum motivo, o destino não receber os três segmentos, por exemplo, devido à sobrecarga do receptor, ele não enviará uma confirmação [COM98]. Por não receber a confirmação, a origem saberá que os segmentos deverão ser retransmitidos e que a taxa de transmissão deverá ser diminuída, conforme discutido na Seção 2.2.1.

### 2.2.1. Serviço de Controle de Transmissão Confiável

O protocolo TCP oferece serviço de transmissão confiável de dados utilizando-se de uma técnica chamada de confirmação positiva (do inglês: *positive acknowledgement*), ou seja, para cada segmento transmitido o receptor envia um segmento com flag ACK, que indica a confirmação do recebimento do segmento. A Figura 2-4 ilustra o mecanismo de confirmações positivas utilizada pelo protocolo TCP no esquema básico de transmissão *Stop-and-Wait* [LIN84].

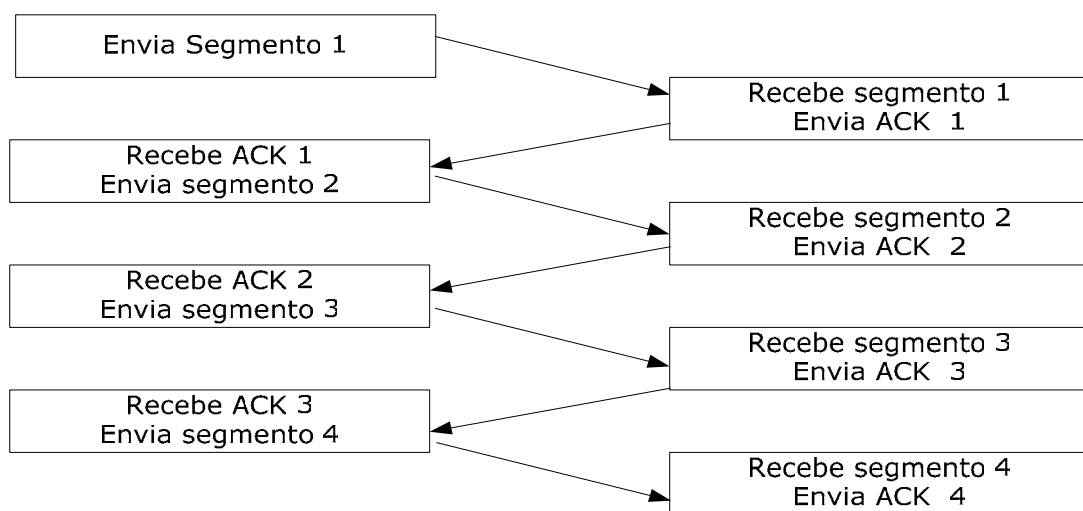


Figura 2-4 Exemplo de transmissão com confirmação positiva (ACK)

Basicamente, o protocolo TCP provê dois mecanismos para detecção de segmentos perdidos, sendo uma das formas através de um temporizador, definida como RTO (do inglês: *Retransmission Time Out*), conforme ilustra a Figura 2-5, que é o tempo que o transmissor tem para esperar a chegada de um ACK enviado pelo receptor confirmando o recebimento do segmento. Se o RTO expirar antes da chegada do ACK, então o TCP assume que o segmento foi perdido e inicia-se uma retransmissão do segmento perdido [COM98].



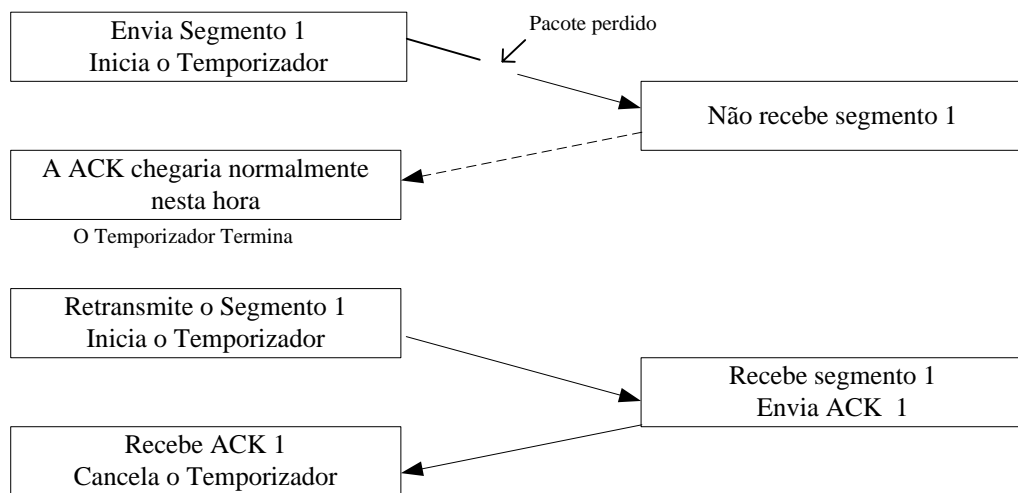


Figura 2-5: Modelo de detecção de erros por temporizador

Outra maneira de detectar perdas é através de ACK duplicados. Suponha que o transmissor envie os segmentos 1, 2, 3 e 4 e o segmento 1 seja perdido. Assim que o segmento 2 chegar, o receptor enviará um ACK com o número de seqüência do segmento 1. Quando receber o segmento 3, ele enviará um ACK com o número de seqüência do segmento 1, e quando o segmento 4 chegar, ele enviará um ACK com o número de seqüência do segmento 1, a Figura 2-6 ilustra este exemplo. Quando múltiplos ACK duplicados (normalmente 3) são recebidos com o mesmo número de seqüência, o transmissor assume que o segmento foi perdido ou danificado e retransmite o mesmo.

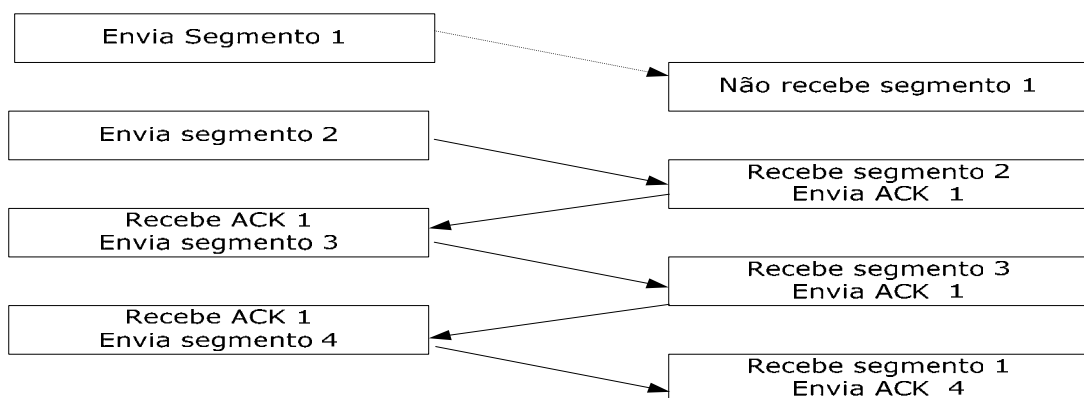


Figura 2-6 - Exemplo de transmissão com ACK duplicados

### 2.2.2. Serviço de Controle de Fluxo de Dados

O mecanismo de controle de fluxo de dados do protocolo TCP baseia-se no envio do tamanho da janela de recepção determinada pelo lado TCP do receptor. O protocolo TCP utiliza-se de um mecanismo especializado de janela deslizante para resolver o problema de controle de fluxo a fim de se obter uma transmissão eficaz. Com a utilização do mecanismo de janela deslizante do TCP, torna-se possível o envio de uma quantidade de segmentos simultâneos antes que uma confirmação de recebimento do segmento retorne, aumentando significativamente dessa forma o desempenho da rede, conforme Figura 2-7. O tamanho da janela significa a quantidade de segmentos ou bytes que o lado transmissor TCP é permitido enviar sem a necessidade de esperar as confirmações do lado receptor.

A implementação de janela deslizante do protocolo TCP permite que o tamanho da janela varie com o passar do tempo, sendo que em cada confirmação ACK enviado pelo receptor pode-se definir um novo tamanho da janela de advertência, sendo que esta janela especifica quantos novos segmentos o receptor estará preparado a receber.

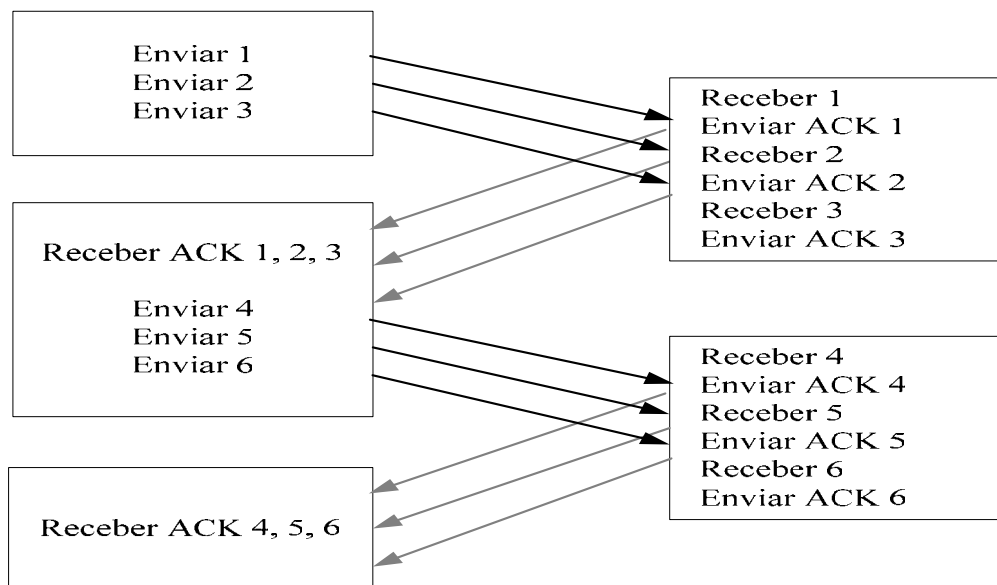


Figura 2-7: Modelo de transmissão de três pacotes com protocolo de janelas deslizantes

O controle de fluxo torna-se um mecanismo essencial para troca de dados na rede, principalmente quando a comunicação passa por várias redes e roteadores de várias velocidades e capacidades diferentes. Basicamente dois problemas atingem o fluxo de dados, o primeiro quando o TCP necessita de um controle fim-a-fim na conexão, precisando de um controle de fluxo entre a origem e o destino. Caso o destino seja de desempenho menor que o

transmissor, o receptor deverá regular o fluxo de dados para que o transmissor não envie mais dados do que o receptor possa processar, garantindo desta forma uma transmissão fim-a-fim confiável e evitando-se também a perda de segmentos e a necessidade do envio de retransmissões desnecessárias. O outro problema refere-se ao controle de fluxo que deverá ser efetuado nos sistemas intermediários, (roteadores, por exemplo), permitindo controlar que a origem não envie mais tráfego de dados que os sistemas intermediários possam tolerar. Quando ocorre esse problema, essa condição denomina-se congestionamento, sendo os mecanismos para resolver esse problema são denominados controle de congestionamento, (discutido na Seção 2.2.3). Desta forma pode-se dizer que a janela de congestionamento é o controle de fluxo imposto pelo emissor, enquanto o tamanho da janela anunciada de advertência é o controle de fluxo imposto pelo receptor [PET96].

### **2.2.3. Mecanismos de Controle de Congestionamento**

Como cada ponto que interliga a rede possui uma capacidade diferente de armazenamento e processamento, necessitando-se dessa forma, de um mecanismo que verifique a sobrecarga nos pontos de comutação e reajam a esse fator. Os pontos terminais (transmissor e receptor) geralmente não sabem onde está ocorrendo o congestionamento, sendo que para os pontos terminais o congestionamento simplesmente significa um aumento no retardo. Desta forma, para evitar o congestionamento, dois algoritmos são comumente utilizados hoje nas implementações do protocolo TCP, que são o *início lento* e o *colapso de congestionamento*, discutidos nas Seções 2.2.3.1 e 2.2.3.2, respectivamente.

#### **2.2.3.1. Descrição do Procedimento de *Início Lento***

Quando uma conexão TCP é estabelecida, o tamanho da janela de advertência do lado receptor já é reconhecido pelo lado transmissor. Contudo, é a capacidade da rede que decide o tamanho da janela de congestionamento, que ainda é desconhecida pelo lado transmissor. Então o protocolo TCP utiliza um mecanismo chamado de início lento [JAC88] para explorar a capacidade da rede e determinar o tamanho da janela de congestionamento dinamicamente. No início, o tamanho da janela de congestionamento é iniciado com o valor de um (01) segmento, assim o transmissor transmite somente um (01) segmento para o lado receptor e então espera pela confirmação de recebimento desse segmento. Caso uma confirmação de recebimento positiva seja recebida pelo transmissor, o protocolo TCP do lado transmissor assume que a rede está capacitada para transmitir pelo menos um (01) segmento. Então é

incrementado por um o tamanho da janela de congestionamento e enviado dois segmentos para o lado receptor. Se os dois segmentos retornarem uma confirmação de recebimento positiva para o transmissor, o transmissor deverá incrementar o tamanho da janela de congestionamento por dois (02) e então enviar quatro (04) segmentos na próxima transmissão, dobrando dessa forma o tamanho da janela de congestionamento para cada confirmação de recebimento de todos os ACK que foram enviados na janela de congestionamento. Isto quer dizer que o aumento da janela de congestionamento se dará de forma exponencial, sendo que ele irá aumentar até atingir um valor referenciado pela variável *ssthresh* [JAC90], denominado variável de início lento. Esta variável é mantida pelo TCP do lado transmissor e inicializado no início da transmissão, desta forma quando é atingido esse valor, imediatamente o transmissor entra no estágio de colapso de congestionamento.

#### **2.2.3.2. Descrição do Procedimento de Colapso de Congestionamento**

Assim que o tamanho da janela de congestionamento excede o valor determinado em *ssthresh*, o incremento exponencial adotado no estágio de início lento se torna inviável. Desta forma, um esquema chamado de colapso de congestionamento, com um incremento linear do tamanho da janela de congestionamento é utilizado para analisar a capacidade da rede. Neste estágio, o tamanho da janela de congestionamento cresce por um (01) segmento a cada confirmação de recebimento positiva de todos os segmentos que estão sendo transmitidos na janela.

Tanto o mecanismo de início lento quanto de colapso de congestionamento podem prevenir que o TCP do lado transmissor envie muitos segmentos em uma rede já congestionada. Como os ACK retornam para o TCP do lado transmissor, o tamanho da janela deslizante é incrementada e eventualmente limitado pelo tamanho da janela de advertência do lado receptor.

### **2.3. Desempenho do Protocolo TCP em Enlaces de Rádio**

Nesta seção, fazemos uma abordagem dos principais problemas que envolvem o desempenho do protocolo TCP quando aplicado diretamente na comunicação de dados em redes sem fio.

#### **2.3.1. Protocolo TCP com Altas Taxas de Erro no Canal de Rádio**

Uma alta na taxa de erro de quadro é a principal diferença entre uma rede cabeada e uma rede sem fio. Algumas das razões nas altas taxas de erro em redes sem fio devem-se às

interferências co-canal, alta mobilidade e desvanecimento do canal. A taxa de erro de pacote em redes sem fio varia entre 1% a 10%, valor esse não tolerado em uma transmissão de dados utilizando o protocolo TCP, porque causará uma grande degradação do desempenho.

Uma consequência da alta taxa de erro do canal é a diminuição pela metade do tamanho da janela de congestionamento toda vez que um segmento perdido for detectado. A rápida diminuição do tamanho da janela de congestionamento baseia-se na assunção de que todos os segmentos perdidos na rede são causados por congestionamento, pois este é um modo efetivo para evitar um colapso no sistema devido a congestionamento na rede. Infelizmente, o protocolo TCP não pode diferenciar entre a perda de segmentos causados por congestionamento na rede e perdas de segmentos devido a erro gerado pelo meio de transmissão, neste caso rede sem fio. Conseqüentemente, o protocolo TCP erroneamente interpretará um segmento perdido devido a erro no canal como sendo um congestionamento da rede, diminuindo pela metade o tamanho da janela de congestionamento, reduzindo assim o desempenho da conexão TCP desnecessariamente.

### **2.3.2. Protocolo TCP com Baixa Taxa de Transmissão**

Redes sem fio também são caracterizadas pela sua menor capacidade de transmissão de dados quando comparada a redes cabeadas, principalmente ainda quando adicionado a ela as altas taxas de erros caracterizadas pelas redes sem fio. Em uma rede sem fio com baixa largura de banda, o tamanho da janela de transmissão é tipicamente pequeno, que significa menos segmentos sendo transportados. Devido a alta taxa de erro de bit gerados em redes sem fio, os ACK duplicados poderiam ser perdidos e não serem recebidos pelo protocolo TCP transmissor. Conseqüentemente, mais retransmissões de segmentos deverão ocorrer devido à expiração do tempo do temporizador do segmento devido à recepção de ACK duplicados, desta forma, como descrito anteriormente, a retransmissão enviada pela detecção de ACK duplicado é mais eficiente que a retransmissão detectada pelo temporizador, diminuindo ainda mais o desempenho da rede em enlaces sem fio.

Outro fator que proporcionará uma diminuição do desempenho com a transmissão de dados utilizando o protocolo TCP em redes sem fio será devido ao fato que o tempo estimado de ida e volta mantido pelo TCP transmissor será alto. Como o valor do temporizador é calculado baseado na média do valor do tempo estimado de ida e volta do segmento TCP, terá seu valor aumentado. Conseqüentemente como o protocolo TCP espera expirar o tempo do

temporizador para retransmitir o segmento perdido na ausência de ACK duplicados, o que poderá acontecer será uma degradação no desempenho do protocolo TCP [PRA03].

## **2.4. Conclusão**

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos básicos com relação as duas camadas de protocolo utilizadas na ferramenta de simulação, que são a camada de enlace e a camada de transporte.

Quanto a camada de enlace foi apresentado algumas considerações e suas principais funções, objetivando analisar algumas características e suas formas de implementação a fim de proporcionar uma diminuição da quantidade de erros geradas pela camada física.

Na camada de transporte, abordamos o protocolo TCP, descrevendo suas principais funcionalidades. Outro fator importante abordado foi com relação a sua aplicabilidade quando transmitido diretamente em enlaces sem fio, pelo qual suas características de implementação não proporciona uma transmissão muito eficiente para redes sem fio, necessitando desta forma que se façam alguns ajustes na sua forma de implementação a fim de melhor o seu desempenho.

## Capítulo 3

# Modelos Discretos de Canais de Rádio

### 3.1.Introdução

Utiliza-se a modelagem discreta de canais de rádio móvel para descrever a distribuição estatística de erros do canal, simplificando a análise dos efeitos do desvanecimento na transmissão de blocos de dados. Simplificam também a análise de eficiência dos protocolos de comunicação e auxiliam na escolha das melhores estratégias de controle de erros, como no caso de protocolos da camada de enlace.

As comunicações sem fio utilizam ondas eletromagnéticas para transportar informação. Devido à natureza da propagação da onda, o fenômeno da existência de variações aleatórias ao longo do tempo da intensidade do sinal recebido gera o que é conhecido por desvanecimento, ou seja, tal fenômeno não estaria presente nas ligações caso não existisse entre as antenas um meio sujeito a mudanças nas suas características. Este efeito causa grandes danos à confiabilidade de sistemas em enlaces sem fio.

As ondas de rádio transmitidas também interagem com diversos objetos físicos dentro do canal móvel, como edifícios, árvores, morros e automóveis em movimento. A interação da onda eletromagnética com os objetos ao seu redor é um processo muito complexo que leva em consideração a difração, a refração e a reflexão. Ainda mais, ondas de diferentes frequências interagem com estes objetos de modo diferente. O resultado desta interação é conhecido como propagação multipercurso, onde cada onda transmitida chega ao receptor por diferentes caminhos de propagação. Cada caminho tem seu próprio período de amostragem e seu desvio Doppler. O desvio Doppler é um desvio ou espalhamento aparente da frequência

gerada pela mobilidade do usuário ou então pelo movimento relativo de qualquer objeto dentro do canal móvel, como por exemplo, automóveis em movimento. Desta forma determina-se a taxa do desvanecimento do canal. Quando a taxa de desvanecimento for baixa, o processo é considerado muito correlacionado, caracterizando desvanecimento lento. Para altos valores da taxa de desvanecimento, a superposição dos sinais leva a interferência construtiva e destrutiva do sinal recebido, podendo até cancelar parte do sinal por curtos períodos de tempo, considerada esta variação nesta potência do sinal como o desvanecimento multipercurso. Este tipo de desvanecimento é conhecido como desvanecimento rápido e na maioria dos casos será seletivo na frequência, afetando aleatoriamente apenas uma pequena porção da largura do canal em um dado intervalo de tempo.

As amplitudes do sinal desvanecidas podem ser modeladas estatisticamente. A distribuição *Rice* é caracterizada por possuir uma componente de visada direta. Já a distribuição *Rayleigh* [KEN69], representa o efeito de múltiplos sinais, refletidos ou refratados, que são captados por um receptor sem que haja uma componente ou direção principal, isto é, quando não tiver uma componente de visada direta. Como em comunicações móveis é freqüente não se ter uma visada direta, devido à mobilidade do usuário, o principal modelo utilizado é do tipo *Rayleigh*.

Descrevemos a caracterização discreta de canais de rádio móvel utilizando dois modelos, canal discreto sem memória e com memória, apresentando desta forma duas versões de tipo de desvanecimento do sinal, sendo o desvanecimento lento caracterizado pela média do conjunto das flutuações do sinal e desvanecimento rápido caracterizado pela variação do sinal em torno desse valor médio. Canal discreto sem memória, denominado de canal binário simétrico, caracteriza-se pelos erros gerados na transmissão possuírem uma probabilidade fixa entre eles, sendo independentes e uniformemente distribuídos, sendo este modelo apropriado para avaliação de desempenho dos protocolos em ambientes com desvanecimento rápido e seletivo na frequência. No modelo do canal discreto com memória, utilizamos cadeias de Markov com estados finitos para modelar a distribuição estatística de erros de bloco em canais com desvanecimento. Utilizamos para efeito de simulação o modelo de Markov de primeira ordem, apropriados para avaliação de desempenho de protocolos de comunicação em redes sem fio e redes móveis, em ambientes com desvanecimento lento e não seletivos em frequência [CHO96].



### 3.2. Modelo Discreto de Canal sem Memória

Conforme considerado em [BAO96], em alguns processos de simulação assume-se que, no modelo do canal, os erros de transmissão são independentes e uniformemente distribuídos. Este modelo define-se como um modelo discreto de canal sem memória, onde as probabilidades atribuídas ao quadro transmitido com falha sendo independentes aos quadros anteriores transmitidos. Um modelo de canal largamente empregado é o canal binário simétrico. Por exemplo, considerando o caso do canal binário simétrico, podemos definir sendo os símbolos de entrada denotados por  $x_0 = 0$  e  $x_1 = 1$ , e o de saída por  $y_0 = 0$  e  $y_1 = 1$ . Designamos simétrico porque a probabilidade  $p$  de receber 1 supondo ter sido transmitido 0 é igual à probabilidade de receber 0 supondo ter sido transmitido 1, conforme mostrado na Figura 3-1.

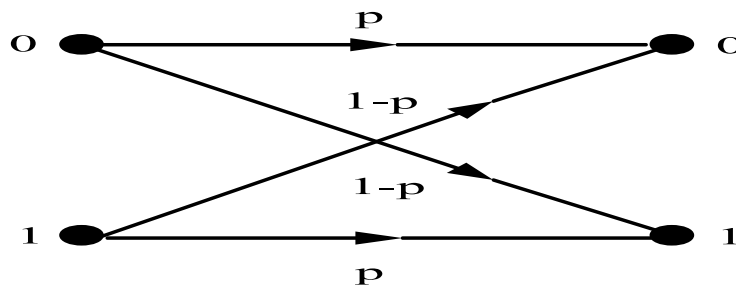


Figura 3-1: Canal binário simétrico

onde  $p$  representa a probabilidade de um quadro da entrada (0 ou 1) ser transferida sem erro para o receptor, e a variável  $(1-p)$  representa a probabilidade fixa do quadro ser transmitida com erro, ou seja, onde se 0 transforma-se em 1 e 1 transforma-se em 0. A origem da denominação do canal, a partir desse modelo, pode definir como:

$$p(0/0) = p(1/1) = p, \quad (3.1)$$

$$p(0/1) = p(1/0) = 1 - p. \quad (3.2)$$

### 3.3. Modelo Discreto de Canal com Memória

Considera-se que a diferença entre o modelo do canal com memória do modelo sem memória pelo fato de ter cada símbolo ( $x_0 = 0$  e  $x_1 = 1$ , e o de saída por  $y_0 = 0$  e  $y_1 = 1$ ) ser

gerada estatisticamente dependente aos símbolos gerados anteriormente. Um modelo do canal com memória é também um processo estocástico. A utilização do modelo de Markov de primeira ordem para modelar a distribuição estatística de erros de bloco em canais com memória com desvanecimento do tipo Rayleigh é indicado por atingir uma aproximação adequada do modelo do canal. Um dos modelos utilizados, porém não obtendo um resultado muito apurado, porém satisfatório para o processo de simulação, é o modelo de erro aproximado à cadeia de Markov de dois estados [ZOR95], implicando que apenas a informação de estado do símbolo imediatamente anterior ao símbolo atual é relevante para o processo de decisão, conforme a Figura 3-2.

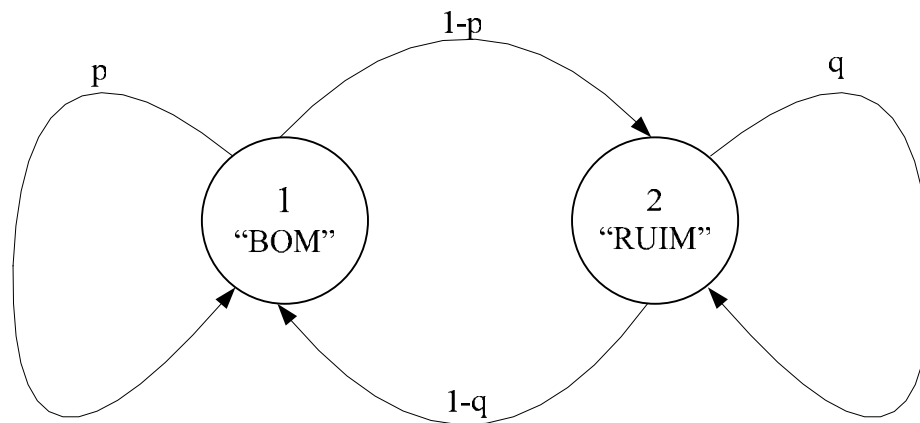


Figura 3-2: Cadeia de Markov de dois estados

Podemos assumir que o estado do canal não muda durante a fase de transmissão do quadro no enlace de rádio. Desta forma definimos que, o estado do canal durante a transmissão do quadro como sendo  $S_t$ , onde  $S_t \in \{1, 2\}$ . Os valores 1 e 2 correspondem ao estado do canal “bom” e “ruim”, respectivamente. O estado “bom” do canal representa que o meio de transmissão onde os quadros enviados são transmitidos corretamente para o receptor. O estado “ruim” do canal representa que o meio de transmissão onde os quadros enviados são transmitidos com falha para o receptor.

A duração da margem de erros depende da margem de desvanecimento do canal e da frequência Doppler [ALE01] no processo de desvanecimento. O efeito Doppler faz com que a frequência do lado transmissor não seja idêntica no lado receptor devido ao desvio provocado pelo movimento relativo entre o transmissor e o receptor. O desvanecimento multipercurso no canal de rádio móvel é considerado seguindo a distribuição Rayleigh [ALE01]. Para um canal com desvanescimento Rayleigh correlacionado, a sequência de bloco

de dados recebidos com sucesso ou falha, pode ser aproximada por uma cadeia de Markov com dois estados [ZOR95], cuja matriz de transição de probabilidade é dada por:

$$M = \begin{bmatrix} p & 1-p \\ 1-q & q \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

Os valores  $p$  e  $1-q$  representam as probabilidades do  $j$ -ésimo bloco transmitido ser recebido com sucesso, dado que o  $(j-1)$ -ésimo bloco foi recebido com sucesso ou falha, respectivamente. O termo  $(1-q)^{-1}$  representa a duração média dos surtos de erro de quadro. A probabilidade média de erro é demonstrada na equação abaixo, onde  $F$  representa a margem de desvanecimento Rayleigh do canal [ZOR95].

$$P_E = \frac{1-p}{2-p-q} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{F}\right), \quad (3.4)$$

Dada à margem de desvanecimento  $F$ , que é a margem do desvanecimento do sinal dominado por multipercurso aleatório, a frequência Doppler  $f_d$  e o tamanho do símbolo  $T$ , que é período de amostragem do canal [WAN96], a matriz de transição desde modelo de Markov de dois estados poderá ser calculada. A média da taxa de erro do quadro denotada por  $P_E$  depende de  $F$ , sendo que a relação entre  $F$  e  $P_E$  é decidida pelas características da camada física como modulação e esquemas de codificação do canal. As propriedades de correlação do processo de desvanecimento Rayleigh dependem apenas do produto  $f_d \cdot T$ , no qual decide o grau de correlação entre dois quadros com transmissão consecutiva.

Baixos valores do  $f_d \cdot T$  indicam um lento desvanecimento do canal e uma alta correlação entre dois quadros consecutivos, enquanto um valor alto para  $f_d \cdot T$  indica um rápido desvanecimento do canal e uma baixa correlação entre os quadros. Em [LIN03] é indicado que quando o valor  $f_d \cdot T = 1$ , este modelo reduz para o modelo do canal com erros de transmissão independentes e uniformemente distribuídos, no caso um modelo de canal sem memória.

### 3.4. Modelo do Canal para Surtos de Erro

Conforme proposto em [VUK01], o modelo de canal é denominado como sendo de surto de erros, onde se considera que o transmissor se recupere da rajada de surtos de erro após um ajuste de potência. O objetivo deste controle é manter atualizada a taxa de erro de quadro especificada para o sistema, onde a estação móvel monitora constantemente a taxa de erro do canal e relata periodicamente esta informação para a estação base, enviando uma mensagem de relato de medida de potência - PMRM (do inglês: *Power Measurement Report Message*). Baseada nesta informação a estação base faz o ajuste da potência de transmissão.

Como discutido na Seção 3.3, utiliza-se da cadeia de Markov de dois estados para modelar a seqüência de quadros transmitidos com sucesso ou falha de acordo com a presença do valor do desvanecimento Rayleigh. Conforme [VUK01], a variação lenta do desvanecimento e perda de percurso e atenuação poderá ser compensada perfeitamente pelo controle de potência na transmissão. Quando o relato de medida de potência é utilizado entre uma estação móvel e a estação base em intervalos bastante longos, os quadros recebidos com erro em rajadas só serão controlados pelo processo de desvanecimento e não deverá ser influenciado pelo controle de potência do transmissor. Contudo, quando um rápido controle de potência é usado, a propriedade do canal com memória, que utiliza a cadeia de Markov para controlar o tamanho dos surtos de erro não irá ser mais necessária.

Este processo poderá ser utilizado para sistemas de comunicação móvel CDMA, onde neste sistema o nível de potência da estação móvel é controlada pela estação base.

Em [VUK01], os autores apresentam um modelo de canal onde o controle de surtos de erro não deverá ser controlado em função do desvanecimento do canal, mas leva-se em conta o impacto do esquema de controle de potência na recuperação do estado do canal.

Neste modelo, denominado modelo de surto de erros, considera-se que o transmissor se recupere dos surtos de erro após um ajuste de potência. Pode-se definir esse modelo como sendo,

$$P_E(i) = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ m \cdot \text{FER} & i \leq 6, \\ 0 & i > 6 \end{cases} \quad (3.5)$$

onde  $i$  é o número do quadro que sofreu o erro e  $m$  é o parâmetro usado para modelar a velocidade da estação móvel ou aumentar o número de erros em cada surto de erro.

Desta forma conforme equação 3.5, utilizando-se ( $m = 6$ ), pode-se definir que após um erro de quadro inicial, a taxa de erro nos 5 (cinco) quadros subsequentes será potencialmente maior que a taxa de erro média.

### **3.5. Conclusão**

Neste capítulo apresentamos alguns conceitos básicos com relação aos modelos discretos do canal, utilizados para modelar o processo de transmissão de dados em canais de rádio.

Os modelos apresentados foram os modelos sem memória, caracterizado pela ocorrência de erros serem independentes e uniformemente distribuídos e o modelo com memória, sendo discutido um modelo proposto em [VUK01], que se caracteriza em ser um modelo de surtos de erro, onde após a ocorrência de um erro de quadro, os quadros subsequentes a ele terão uma probabilidade maior de ocorrer erro também por um período de tempo determinado.

## Capítulo 4

# Ferramenta de Simulação para Análise de Desempenho

### 4.1.Introdução

Neste capítulo, apresentamos uma descrição da ferramenta de simulação desenvolvida para análise de desempenho do protocolo TCP/IP em redes sem fio. O software simulador foi escrito utilizando-se da linguagem de programação C++, no qual foi dividida em camadas, cada uma com funcionalidade diferente, detalhadas na Seção 4.2. Podemos citar entre suas principais características o fato da ferramenta possibilitar a alteração de parâmetros que afetam o desempenho do protocolo TCP em todas as camadas separadamente. Desta forma, pode-se alterar parâmetros referentes ao modelo do canal de rádio, alterar parâmetros referentes ao controle e detecção de erros da camada de enlace, e controle de fluxo e congestionamento da camada de transporte.

A ferramenta permite através de simulações a obtenção de resultados com a variação da transmissão de dados em ambientes diversos. Desta forma, permite-se fazer uma análise das melhores estratégias de alteração de parâmetros, tanto da camada de enlace de dados quanto da camada de transporte, obtendo-se resultados como, vazão de dados, probabilidade de erro do pacote e atraso médio em ambas as camadas.

O desenvolvimento de uma nova ferramenta de simulação foi motivado pelo fato de outros softwares simuladores não possuírem uma facilidade de alteração de parâmetros do sistema relacionados principalmente com as camadas de enlace e física. Podemos citar como exemplo o software simulador NS-2 (Network Simulator) [NET02], mesmo sendo um simulador baseado em plataforma aberta e de domínio público, a alteração e a criação de novos modelos exige um alto grau de conhecimento da ferramenta, necessitando dessa forma, um tempo

de estudo do simulador muito elevado. Esta necessidade da criação de novos modelos se faz necessária quando são desejadas simulações de casos específicos de redes sem fio, como por exemplo, simular o desempenho da camada do protocolo RLP (do inglês: *Radio Link Protocol*) no CDMA IS-95.

Este capítulo está dividido da seguinte forma: Seção 4.2 apresenta uma descrição do modelo genérico da ferramenta de simulação, na Seção 4.3 o funcionamento da camada de enlace de dados e suas características e na Seção 4.4, é descrito o funcionamento da camada do protocolo TCP com as suas principais características que influenciam no desempenho do sistema.

## **4.2. Descrição Geral da Ferramenta de Simulação**

Nesta seção descrevemos o modelo de funcionamento da ferramenta para simulação, que tem por objetivo obter estimativas do desempenho do protocolo TCP em redes sem fio. Permite-se que haja uma parametrização em cada uma das três camadas que compõem a ferramenta, havendo sempre interação entre elas.

Para simulação do modelo do canal, conforme discutido no Capítulo 3, a alteração dos parâmetros do modelo canal se faz através da utilização de classes, sendo que através delas define-se qual o modelo de canal será utilizado para a transmissão e acesso ao meio.

A camada de enlace teve seu desenvolvimento voltado a detectar e a corrigir os quadros transmitidos com falha pelo meio físico, onde sua principal finalidade é melhorar o desempenho da camada de transporte (protocolo TCP). O esquema utilizado na ferramenta para simulação de controle e detecção de erro na camada de enlace foi o NAK (do inglês: *Negative Acknowledgment*). O lado receptor só envia uma notificação para o transmissor caso detecte falha do quadro transmitido, não havendo a necessidade desta forma, de uma confirmação a cada recebimento de quadro transmitido com sucesso. Porém, este mecanismo não pode eliminar completamente os quadros com erro detectados, pois o número de retransmissões é finito, sendo que na camada do protocolo de enlace é definido o parâmetro da quantidade máxima de retransmissões que poderão ocorrer.

A camada de transporte, no qual o protocolo TCP é utilizado, foi desenvolvida de forma a permitir um controle de entrega confiável dos pacotes transmitidos, fazendo controle de fluxo de dados tanto no transmissor quanto do receptor, garantindo uma entrega ordenada dos segmentos TCP.

O funcionamento básico da ferramenta para simulação consiste em obter resultados através da parametrização das camadas de forma independentes. A interação entre as camadas é que proporcionará uma análise do desempenho do protocolo TCP em redes sem fio, permitindo avaliar quais os melhores parâmetros a serem utilizados na camada de enlace e camada TCP em função do modelo do canal utilizado. O processo básico da simulação de uma transmissão de dados utilizando-se da ferramenta de simulação é ilustrado na Figura 4-1.

A simulação inicia-se na geração de segmentos TCP que são encaminhados para sua fila de transmissão. O próximo procedimento após iniciar-se a transmissão é enviá-lo para a camada de enlace que dividirá o segmento TCP em diversos quadros menores para serem transmitidos no meio físico.

A camada de enlace, que tem como sua principal função diminuir a taxa de erro do quadro, utiliza do mecanismo de controle de erro baseado em retransmissões, efetuado de acordo com o parâmetro definido de quantas retransmissões a camada de enlace poderá fazer para cada quadro transmitido. Desta forma, quando um quadro é transmitido com erro é efetuada a sua retransmissão até se atingir o número máximo de retransmissão permitida. Outros controles de erro (como por exemplo: o FEC) poderão ser embutidos na definição do modelo discreto do canal de rádio utilizado para simulação.

Caso a camada de enlace de dados não consiga recuperar o quadro transmitido com erro, o quadro é encaminhado para a camada de transporte que irá executar o seu controle para solicitar a retransmissão do pacote TCP. Caso todos os quadros sejam transmitidos com sucesso, a camada de transporte remonta o pacote e envia um ACK de confirmação de recebimento para o transmissor.



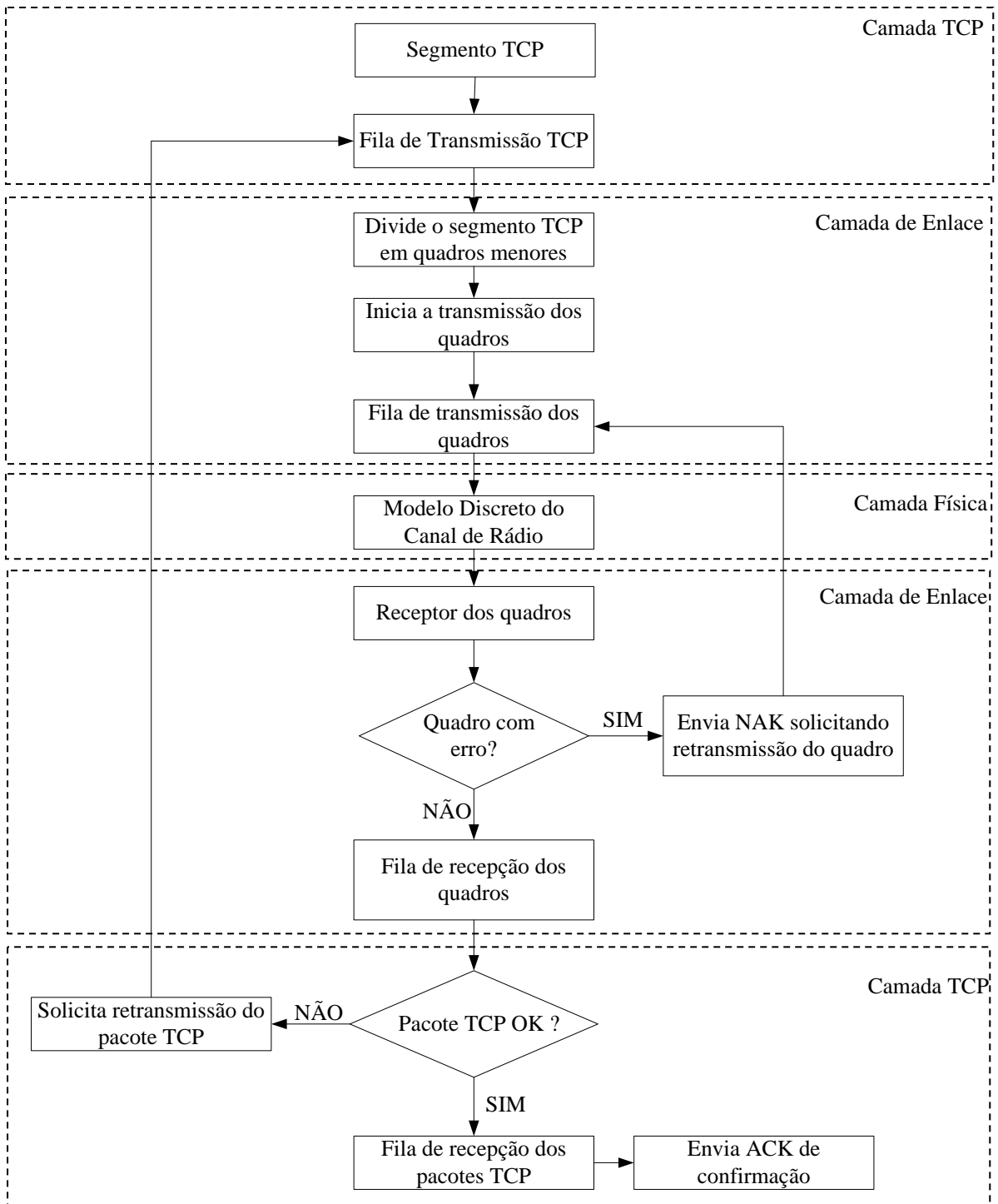


Figura 4-1 – Modelo genérico de transmissão fim a fim

### 4.3. Descrição da Camada de Enlace

O modelo de funcionamento completo da camada de enlace na ferramenta de simulação é ilustrado na Figura 4-2. Antes de descrevermos todas as funções implantadas na camada de enlace, algumas considerações deverão ser efetuadas com relação aos parâmetros utilizados no simulador.

Dentre os parâmetros que necessitam definição e que poderão ser alterados para simular diversas taxas de transmissão temos o  $F_t$ , que é a quantidade total de quadros que poderão ser transmitidos no intervalo de tempo de um segundo, conforme equação (4.1).

$$F_t = \frac{I_q}{1000}, \quad (4.1)$$

onde  $I_q$  define-se como tempo de transmissão de cada quadro em milissegundos, e 1000 o valor correspondente em milissegundos a um segundo.

Outro parâmetro que deverá ser calculado em função do modelo do canal é o  $T_{bps}$ , que define a taxa máxima de transmissão em bits por segundo, conforme equação (4.2).

$$T_{bps} = F_t \cdot T_q, \quad (4.2)$$

onde  $T_q$  representa a quantidade de bits máximo a serem transmitidos em cada quadro da camada de enlace.

Outra função implementada na camada de enlace refere-se ao da divisão dos segmentos TCP em quadros da camada de enlace, no qual define-se  $R$  como a quantidade necessária de quadros para transportar um segmento TCP, conforme equação (4.3).

$$R = \frac{MSS \cdot 8}{T_q}, \quad (4.3)$$

onde que MSS é o tamanho máximo do segmento TCP em bytes sendo multiplicado por 8 (oito), obtendo-se dessa forma a quantidade total de bits do pacote TCP.

Desta forma a fragmentação dos pacotes originários da camada de transporte (protocolo TCP) é efetuada pela camada de enlace, para então serem transferidos pelo canal de enlace de rádio.

Outra funcionalidade da camada de enlace é o controle de detecção e recuperação dos quadros, efetuado com a retransmissão dos quadros, onde se utiliza o protocolo de repetição seletiva finita, baseada em NAK, que é detalhada na Seção 4.3.1.

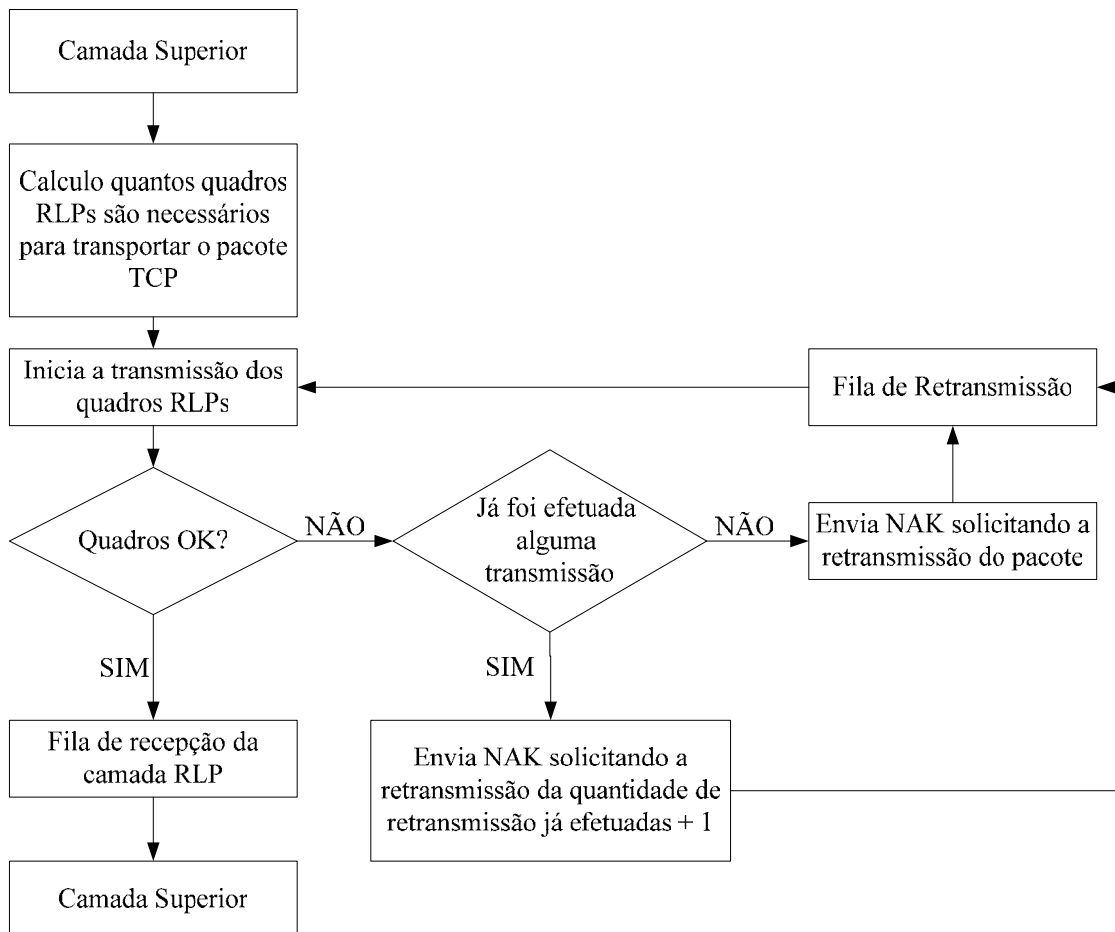


Figura 4-2: Modelo genérico do processo de transmissão da camada de enlace

#### 4.3.1. Procedimento de Controle de Retransmissões

O procedimento de operação utilizado no processo de retransmissão na camada de enlace é do tipo não transparente, isto é, utiliza-se uma confirmação negativa para solicitar a retransmissão dos quadros perdidos. O lado receptor não envia confirmação caso o quadro seja enviado corretamente. As perdas dos quadros são notificadas para o lado transmissor com um quadro NAK, que são enviados através de um temporizador para controle de retransmissões NAK.

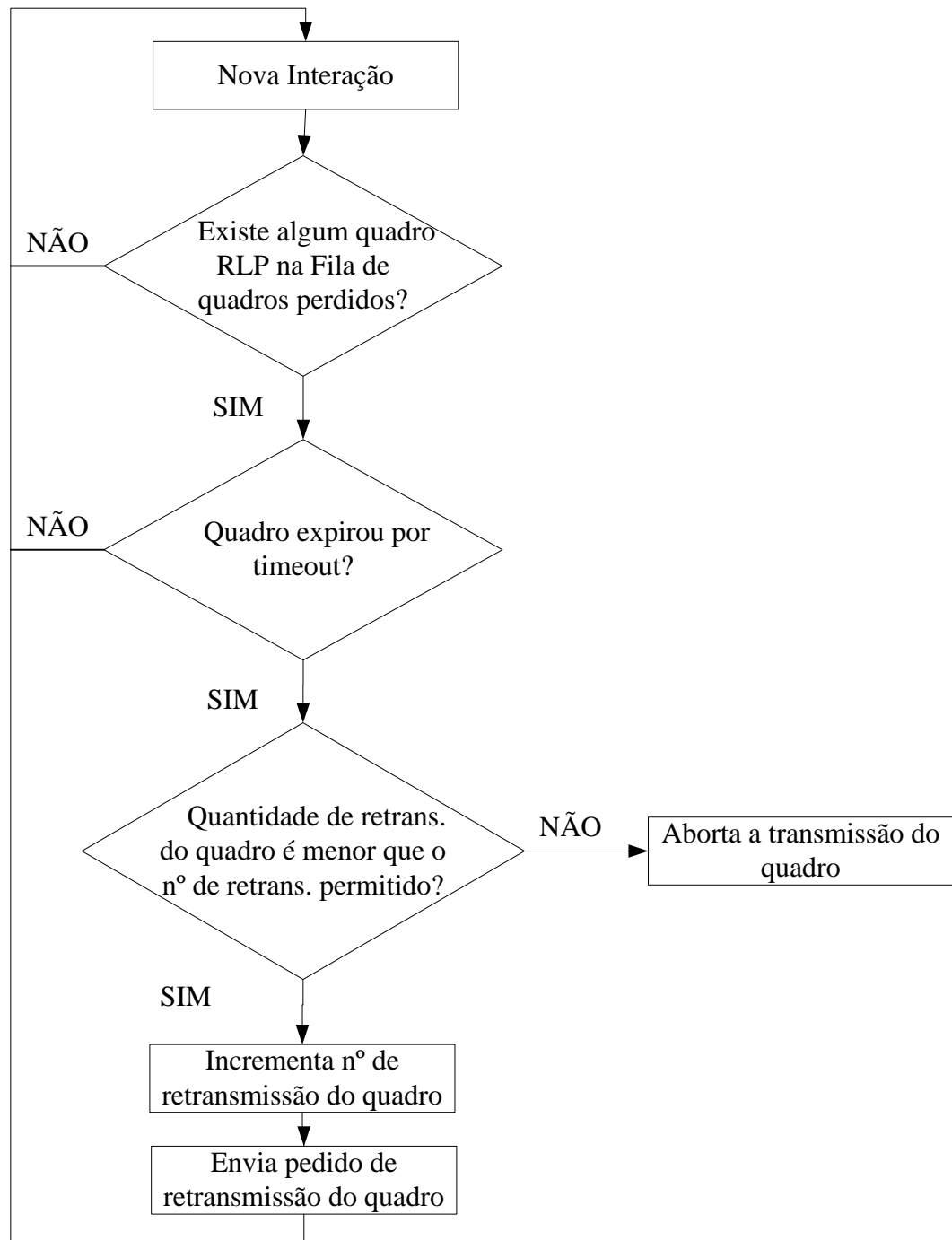


Figura 4-3: Controle de retransmissões controladas por timeout

A Figura 4-3 ilustra o ciclo de retransmissões controladas pelo temporizador dos quadros. A cada nova interação do simulador, é efetuada uma verificação na fila de quadros que foram enviados com erro, caso existindo, consulta-se se o tempo de expiração do quadro se esgotou novamente. Caso ainda não tenha se esgotado, é efetuada uma nova interação para

verificação de outros quadros. Quando detectado que o tempo de expiração do quadro se esgotou, é efetuado um teste para saber quantas vezes já foram efetuadas retransmissões do quadro. Caso o número de retransmissão efetuada pelo quadro seja superior ao configurado pelo simulador, o quadro é abortado e notificado à camada superior (protocolo TCP) para serem efetuadas os procedimentos de correção através desta camada. Caso contrário e sendo possível o envio de retransmissão, o simulador incrementa em *um* o número de retransmissão e envia o pedido de retransmissão, forçando uma nova iteração.

#### 4.3.2. Procedimento de Controle de Recepção dos Quadros

Conforme [CHO00] e definido em [EIA95], foi desenvolvido na ferramenta de simulação um controle que define, para cada quadro transmitido, um número de seqüência adicional e, durante a fase de transmissão, a camada de enlace mantém um número seqüencial. Em nosso caso esse número é denotado por *i* e três contadores de seqüência são definidos por:  $V(S)$ ,  $V(R)$  e  $V(N)$ .

O  $V(S)$  é o número de seqüência do próximo quadro a ser transmitido, o  $V(N)$  é o número de seqüência do quadro mais antigo que está faltando e o  $V(R)$  é o número de seqüência do próximo novo quadro esperado no receptor.

No caso específico utilizado na ferramenta de simulação, também utilizamos filas para o controle da transmissão dos quadros e, para posterior reordenação, em caso específico, quando da necessidade de retransmissão de quadro. Uma fila é utilizada para o controle da transmissão dos quadros que são gerados a partir do recebimento do segmento TCP. Utiliza-se outra fila para a recepção dos quadros recebidos com sucesso e com seu número seqüencial correto, denotado por  $V(R)$ . A cada nova iteração efetua-se uma contagem para averiguar se todos os quadros de um determinado segmento TCP já foram recebidos com sucesso, em caso positivo é efetuada a montagem do segmento TCP e enviado as camadas superiores. A outra fila também tem por finalidade o recebimento dos quadros transmitidos com sucesso, porém com seu número seqüencial diferente do esperado. Efetua-se um controle a cada interação para verificação se o próximo quadro esperado encontra-se nesse fila, em caso afirmativo o quadro é passado para a outra fila de recebimento para posterior montagem do segmento TCP.

Durante a fase de transferência dos dados, a camada de enlace, a fim de manter o controle e gerência de suas filas, age de acordo com algumas condições na

Tabela 3.

Tabela 3: Procedimento a ser adotado para cada quadro recebido

<i>Regras</i>	<i>Condição</i>	<i>Ações</i>
1	Se $i < V(N)$	Descarte o quadro
2	Se $i = V(N)$ e $i < V(R)$	Atualize $V(N)$ para o número de seqüência do próximo quadro mais antigo que esteja faltando; passe os quadros recebidos até $V(N)-1$ para a lista de quadros ordenados.
3	Se $i = V(N)$ e $i = V(R)$	Incremente $V(N)$ e $V(R)$ por 1 e passe todos os quadros recebidos para a lista de quadros ordenados.
4	Se $i > V(N)$ e $i < V(R)$	Armazene o quadro $i$ na lista de quadros recebidos fora de ordem de recebimento, utilizada para posterior reordenação.
5	Se $i > V(N)$ e $i = V(R)$	Incremente $V(R)$ e armazene o quadro $i$ na lista de quadros recebidos fora de ordem de recebimento, utilizada para posterior reordenação.
6	Se $i > V(R)$	Envie NAK para requisição de retransmissão dos quadros com número de seqüência de $V(R)$ até $i-1$ , inclusive.

#### 4.4. Descrição da Camada do Protocolo TCP no Simulador

A camada do protocolo TCP foi implementado com o objetivo de simular uma transmissão fim a fim entre uma estação base e uma estação móvel, não considerando os problemas de desempenho relacionados ao tráfego da Internet, no qual o congestionamento da rede o principal deles.

Os conceitos do protocolo TCP, conforme discutido na Seção 2.1, foram desenvolvidos na ferramenta para simulação com o objetivo de permitir avaliar suas implicações com relação ao desempenho. O protocolo TCP, que tem como característica a entrega confiável dos segmentos, permite que se utilize dos métodos de controle *Stop-and-Wait*, *Go-back-N* e o *Selective Repeat* para controle ARQ.

Os principais conceitos implementados na ferramenta de simulação com relação ao protocolo TCP foram os controles de retransmissões efetuadas pelo cálculo do temporizador dos pacotes TCP e o controle de fluxo de dados. No controle de fluxo de dados é inserido tanto o conceito de janelas deslizantes imposta pelo lado receptor como o controle de

congestionamento controlado pelo lado transmissor, pelo qual serão discutidas nas Seções 4.4.2 e 4.4.1, respectivamente.

Alguns parâmetros devem ser definidos no início da cada transmissão de um novo segmento TCP, com a finalidade da efetivação de seus controles, que são:

- a) Tempo do início da transmissão do segmento;
- b) Um *token*, definido como um campo que sinaliza se o segmento já efetuou retransmissão, indicando também a quantidade de vezes efetuada, tendo com finalidade efetuar o controle de retransmissão do último segmento gerado;
- c) Número do pacote;
- d) Um flag de indicação para o pacote TCP se ele já iniciou a sua transmissão.

Descrevemos abaixo esses parâmetros utilizados pela camada do protocolo TCP na ferramenta para simulação. Seu objetivo é compreender o seu funcionamento para a efetivação dos controles necessários e análise das melhores estratégias e implicações da alteração de parâmetros como, tamanho da janela deslizante, cálculo do valor do temporizador e controle de fluxo.

O parâmetro definido como '*Tempo Inicial*' é iniciado com o tempo corrente quando da geração do segmento e serve para, a cada iteração no simulador, efetuar uma verificação no segmento se ele está expirado ou não pelo temporizador, no qual será discutido na Seção 4.4.4.

O parâmetro '*Token TCP*' é inicialmente definido com o valor 01 (um) e sua finalidade é verificar o número de retransmissões que foram efetuadas em um determinado pacote, sendo a cada retransmissão incrementado por 1 (um). Essa necessidade se deve ao fato onde em um determinado momento ser solicitada à retransmissão de um segmento e logo em seguida o mesmo segmento ser recebido com sucesso, como já foi solicitada a sua retransmissão, quando do seu recebimento o mesmo será abortado.

O parâmetro definido como '*Número do Pacote*' é o número seqüencial dos pacotes gerados que são encaminhados para a fila de transmissão TCP, sendo utilizados também para reordenação dos pacotes, caso os mesmos sejam recebidos fora de ordem.

O campo definido como '*Flag de Transmissão*' tem como objetivo efetuar o controle da janela de transmissão, verificando se o pacote TCP iniciou ou não a sua transmissão. Inicialmente o valor desse parâmetro é zero, sendo esse valor alterado para 01 (um) somente quando é iniciada a transmissão propriamente dita do segmento, sendo enviada para a camada de enlace. Quando um novo segmento TCP é gerado ele vai para uma fila de transmissão

(janela de congestionamento) fazendo, desta forma, o controle de fluxo de dados na janela de transmissão.

#### 4.4.1. Controle de Congestionamento

Nesta Seção, abordamos o aspecto relacionado ao controle de fluxo de dados, que tem por função, através de seus mecanismos de controle garantir um controle de fluxo fim a fim e congestionamento da rede. Desta forma, garantimos uma consistência entre a capacidade que o transmissor tem em transmitir dados com a capacidade do receptor e pontos intermediários têm em recebê-los, desta forma não enviamos múltiplos segmentos na rede até o limite permitido pela janela anunciada pelo receptor ( $W_{\max}$ ).

Desenvolveu-se um mecanismo simplificado para esse controle, pelo qual a camada do protocolo TCP mantém duas variáveis denominadas *Control\_Window* e *Window* para executarem esse controle. A variável *Control\_Window* controla se todos os pacotes permitidos a serem enviados simultaneamente já foram confirmados com o ACK de recebimento. Em caso positivo a variável *Window*, que tem por função controlar quantos pacotes podem ser enviados sem a necessidade de confirmação ACK, poderá ter seu tamanho acrescido de um, até o valor máximo permitido pela janela do receptor ( $W_{\max}$ ).

Exemplificando o seu funcionamento, para todo início de transmissão, a variável *Control\_Window* é inicializada com zero e a variável *Window* com valor ( $W_{\min}$ ). Caso o primeiro pacote seja transmitido com sucesso e o receptor receba o ACK de confirmação, a variável *Control\_Window* é acrescido de um. Caso a variável *Window* tenha sido inicializada como o valor um, o transmissor poderá acrescentar de um o valor da variável *Window* o que permitirá ao transmissor enviar dois pacotes simultaneamente.

#### 4.4.2. Descrição do Mecanismo de Funcionamento da Janela Deslizante

O outro mecanismo utilizado para evitar o congestionamento da rede é com a utilização do conceito de janelas deslizantes, conforme discutido na Seção 2.2.2. Esse controle é efetuado pelo lado receptor da transmissão de dados. Para empregarmos esse mecanismo, utilizamos algumas variáveis responsáveis pelo controle do aumento e diminuição das janelas, no qual definimos como ( $W_{\max}$ ) o tamanho máximo em que a janela poderá alcançar e ( $W_{\min}$ ) o tamanho mínimo que a mesma poderá utilizar na transferência dos dados.



O método de janela deslizante empregado no simulador é um modelo simples de implementação, mas consegue demonstrar através de simulações a sua real eficiência na utilização desse conceito, podendo ser expandido para versões mais sofisticadas e para simulações mais complexas. Desta forma não utilizamos nenhuma versão específica do TCP, pois como não estamos utilizando o controle de detecção de erros por ACK duplicados, a estratégia de retorno da janela se dará sempre para o valor ( $W_{\min}$ ). Porém como todas as versões do TCP, como o *Tahoe*, *Reno* e *NewReno* para caso de detecção de erro pelo valor do temporizador o tamanho da janela retorna para um, não especificamos um modelo, mas sim a regra geral adotada por todos.

O funcionamento das janelas deslizantes no simulador é empregado da seguinte forma: caso o tamanho mínimo da janela seja definido com o tamanho de 01 e se houver sucesso na transmissão do pacote TCP, o tamanho da janela será incrementado por *um* passando a ter o valor *dois* e assim sucessivamente, até atingir o valor máximo definido para a janela ( $W_{\max}$ ). Caso haja falha na transmissão do pacote TCP, independente do tamanho que se encontra a janela, neste caso específico da Figura 4-4, o seu tamanho retornará para o tamanho 01 ( $W_{\min}$ ).

Caso o tamanho da janela esteja com seu tamanho máximo e houver novos pacotes transmitidos com sucesso, o tamanho da janela permanecerá inalterado.

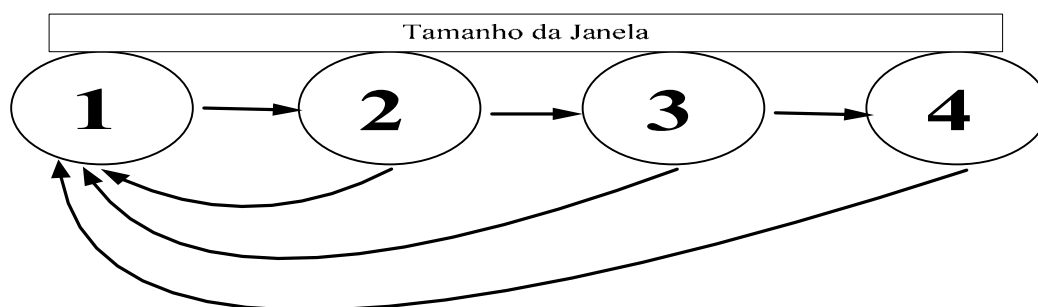


Figura 4-4: Modelo de janelas deslizantes com ( $W_{\min}$ ) 01 e ( $W_{\max}$ ) 04

#### 4.4.3. Métodos de Controle de Erro Utilizando Esquema ARQ

Uma das maiores preocupações na transmissão dos dados é como fazer para controlar os erros de transmissão causados pelos erros do canal, a fim de permitir que os dados transmitidos com sucesso sejam recebidos pelo receptor com o máximo de desempenho do sistema, sem causar a degradação do mesmo.

Para tentar minimizar esse problema, mecanismos de detecção de erros foram desenvolvidos a fim de melhorar a eficiência e o desempenho na comunicação de dados. Utilizou-se o esquema ARQ [LIN84] para tal finalidade, no qual foram utilizados, para efeito de comparação e análise, 03 (três) esquemas básicos de ARQ, que são: *Stop-and-Wait*, *Go-back-N* e *Selective-Repeat* [LIN84].

O esquema *Stop-and-Wait* representa a forma mais simples de se implementar o sistema de controle de detecção de erro, pois utiliza o seguinte princípio para transmissão: o transmissor envia um segmento e então espera por um ACK (confirmação de recebimento) pelo receptor antes de enviar o próximo segmento. Um ACK positivo do receptor indica que o segmento enviado pelo transmissor foi recebido com sucesso e que o transmissor poderá enviar o próximo segmento. Em caso do não recebimento da confirmação por um período de tempo determinado, que será discutido na Seção 4.4.4, pressupõe-se que a transmissão não obteve sucesso e indicará que o transmissor deverá retransmitir o segmento errôneo. Só então depois de receber uma indicação de confirmação do segmento recebido com sucesso é que serão enviados os próximos segmentos. Este esquema é o mais simples e também o menos eficiente, isto devido ao tempo ocioso gasto pelo transmissor na espera do ACK de confirmação por parte do receptor para envio de novos segmentos, desta maneira o desempenho da rede torna-se muito baixo.

No esquema *Go-back-N*, para se obter uma maior eficiência na transmissão, é introduzida a utilização da janela deslizante, discutida na Seção 4.4.2. Quando do envio de segmentos entre o transmissor e o receptor neste esquema, o transmissor envia os segmentos que estão na fila até o número permitido pelo armazenamento da janela, não havendo a necessidade, dessa forma, do recebimento do ACK para o envio de um novo segmento. À medida que o receptor envia um ACK de confirmação de recebimento, a janela é liberada para o envio de mais segmentos. Em caso de falha na transmissão do segmento, o receptor deverá solicitar a retransmissão de todos os segmentos subsequentes a ele na fila de transmissão. Como exemplo, utilizaremos uma janela de recepção com tamanho de oito segmentos. Desta forma considerando-se que todos os oito segmentos tenham iniciado a sua transmissão e o transmissor detectou que o segmento de número quatro foi recebido com erro, o transmissor retransmite novamente o segmento de número quatro e todos a ele subsequentes.

O esquema *Selective-Repeat* é o mais eficiente de todos, pois funciona de maneira similar ao esquema *Go-back-N*, porém com o melhoramento de quando um segmento TCP for detectado com erro e solicitado uma retransmissão, apenas o segmento com falha na transmissão é retransmitido. Desta forma não será necessária à retransmissão de todos os

segmentos subsequentes a ele, como no caso do aplicado no esquema *Go-back-N*. Desta forma aumenta-se o desempenho da rede, principalmente quando o tamanho da janela do lado receptor possui um tamanho elevado, onde, dependendo da condição do canal, o desempenho do sistema obterá um elevado ganho.

#### 4.4.4. Controle de Retransmissão Gerenciadas pelo *Timeout*

Como já abordado nas Seções anteriores, o procedimento de retransmissão dos pacotes TCP se faz através de um temporizador (RTO), sendo um tempo pré-determinado em que o transmissor aguarda pela confirmação de recebimento do pacote pelo receptor.

Portanto, é fundamental no mecanismo de temporizador do pacote TCP a estimativa do tempo de transmissão de ida e volta de um determinado pacote (*RTT* – do inglês: *round trip time*), conforme equação (4.4):

$$RTT = T_{inicial} - T_{final} , \quad (4.4)$$

onde  $T_{inicial}$  é o tempo do início da transmissão do segmento TCP e  $T_{final}$  é o tempo final da transmissão com seu respectivo controle de recebimento.

Como cada estimativa muda com o tempo, devido às condições do canal e aos mecanismos de controle efetuados pela camada de enlace, o protocolo TCP deve monitorar essas mudanças e modificar o tempo do temporizador de forma apropriada.

Desta forma, conforme descrito por [JAC90], o desvio médio é uma boa aproximação do desvio padrão, só que mais fácil de calcular. Desta forma, a fim de se obter uma boa aproximação das altas flutuações no *RTT*, diversas equações são aplicadas para efetuar-se o cálculo de cada nova medida do *RTT*, conforme seguem abaixo:

$$Err = RTT - A , \quad (4.5)$$

onde a variável  $A$  é uma estimativa média do *RTT*, inicializada no início da transmissão com valor zero. Podemos definir *Err* como a diferença entre o último valor medido e a estimativa corrente (*RTT*).

O parâmetro  $A$  é calculado como:

$$A = A + (g * Err) , \quad (4.6)$$

onde  $g$  é ganho igual a  $1/8$  [JAC88].

O desvio padrão atenuado,  $D$ , é definido como:

$$D = D + h \cdot (Err - D), \quad (4.7)$$

É usado para calcular o próximo valor do temporizador de retransmissão ( $RTO$ ), sendo seu valor inicializado no início da transmissão com valor 03 (três). O ganho para o desvio é igual a  $h$  e tem valor 0,25, onde quanto maior o ganho para o desvio, maior será o  $RTO$  em resposta às mudanças do  $RTT$ .

O valor do novo temporizador,  $RTO$ , é calculado como:

$$RTO = A + (4 * D), \quad (4.8)$$

a cada nova iteração da camada do protocolo TCP.

Desta forma podemos obter um valor sempre coerente do valor do temporizador do pacote a fim de evitar retransmissões desnecessárias bem como uma espera muito elevada para detectar falha da transmissão do pacote.

## Capítulo 5

### Estudo de Caso

Neste capítulo apresentamos um estudo de caso por meio de resultados obtidos em simulações, onde o cenário utilizado pelo software simula uma transferência de dados sem interrupção no envio pelo tempo de 120 minutos entre um terminal móvel e a estação base. Temos como objetivo avaliar interações entre a camada de enlace e transporte e o desempenho na comunicação fim a fim do protocolo TCP, com a aplicação e alteração de diversos parâmetros que afetam diretamente o desempenho do sistema, como condições do canal, quantidade de retransmissões e controle de fluxo de dados.

#### 5.1.Introdução

O cenário escolhido para se fazer o estudo de caso para avaliação do desempenho do protocolo TCP em enlaces de rádio foi conforme especificado na norma EIA/TIA/IS-99, ou seja, a norma que define os detalhes da transmissão de dados sobre o padrão CDMA IS-95 [EIA93].

Para o processo de avaliação do sistema, foi simulada uma conexão simples rodando uma grande transferência de dados sem interrupções pelo tempo pré-definido de 120 minutos, entre um terminal móvel e uma estação base [SUD98], conforme Figura 5-1. Os dados das camadas superiores são enviados para a camada de transporte e montados os pacotes TCP. Em seguida esses pacotes são divididos pela camada de enlace (nesse caso pelo protocolo RLP) em quadros menores e finalmente transferidos através do enlace de rádio. Este é o modelo da pilha de protocolo recomendado pelo padrão EIA/TIA/IS-95, conforme ilustra a Figura 5-2 [GAR00]. Neste modelo incluem-se também outras camadas de protocolos, como o ICMP, IP e PPP. Porém, com relação a essas outras camadas não se fará avaliações, pois

elas geram uma sobrecarga no sistema de tamanho fixo, não interferindo diretamente no desempenho dos outros protocolos. Desta forma, podemos considerar que o desempenho do sistema é determinado principalmente pela interação entre as camadas do protocolo TCP e RLP sob diferentes condições do canal e métodos de implantação dessas pilhas.

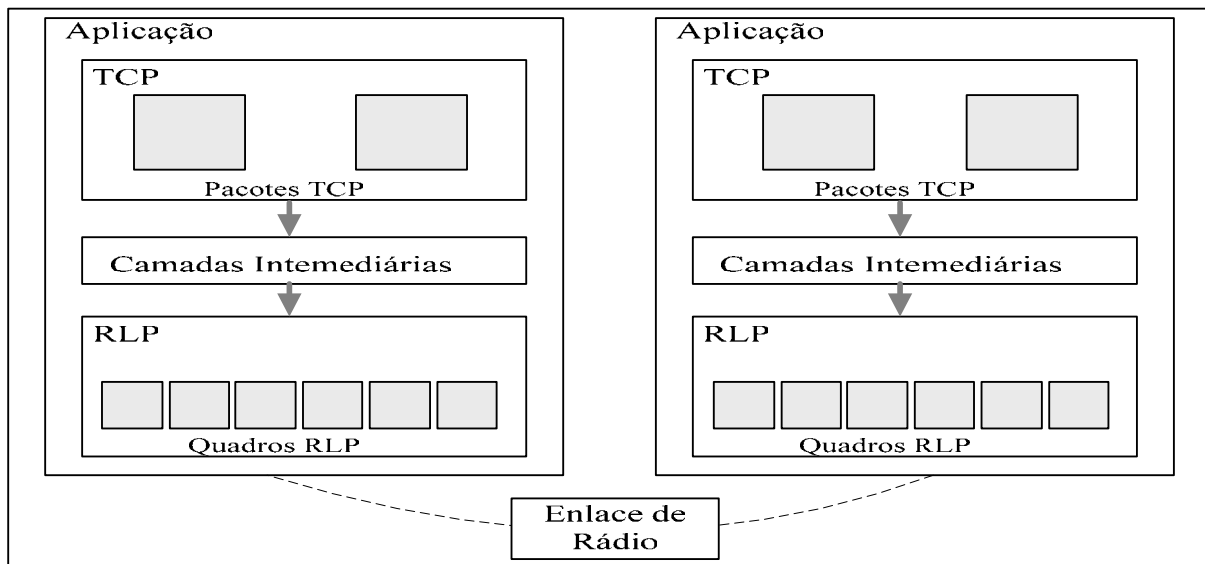


Figura 5-1: Modelo simples de transferência de dados TCP/RLP

Conforme definido pelo padrão [EIA93], o tamanho máximo do segmento TCP (MSS) não poderá ser menor que 536 bytes, o tamanho da janela de advertência deverá ser maior que  $2 \cdot \text{MSS}$  e menor que  $4 \cdot \text{MSS}$ . Também por definição em [EIA95], a camada física transporta quadros de 192 bits, o que equivale a uma duração fixa de quadro de 20 ms em uma taxa de transmissão de 9600 bps, conforme descrito na Seção 4.3, sendo que esses parâmetros também foram utilizados em [BAO96], no qual demonstra alguns resultados obtidos de forma analítica.

O esquema proposto pela norma IS-99 tem por função principal reduzir a taxa de erro de quadro para um nível de eficiência próximo o das redes cabeadas, não causando uma degradação significativa no desempenho da camada TCP. Por definição, o protocolo RLP a fim de permitir uma melhora na eficiência da transmissão dos pacotes TCP no meio físico, fragmenta os pacotes oriundos da camada do protocolo TCP em diversos quadros menores RLP e envia através do meio de transmissão. Tendo em vista que o tamanho do quadro RLP transmitido é menor que o pacote TCP, a probabilidade de erro no quadro na transmissão é menor em relação a se transmitir diretamente um segmento TCP.

Async Data	Fax	
Application Interface		
TCP		ICMP
IP		
SNDCF	IPCP	LCP
PPP		
RLP		
TIA/EIA/IS-95		

Figura 5-2: Estrutura de protocolos do CDMA IS-95

O RLP é um protocolo de repetição seletiva baseado no mecanismo de retransmissão (NAK) de quadros errados ou perdidos, onde o receptor somente envia um NAK para requisitar uma retransmissão quando o quadro RLP não foi recebido corretamente. O protocolo RLP emprega este esquema de NAK para fazer uma recuperação parcial dos quadros errôneos ou faltantes, não conseguindo eliminar desta forma, nesta camada, todos os erros detectados. Os erros não recuperáveis serão encaminhados para camada superior, neste caso o protocolo TCP.

O esquema NAK utilizado pelo protocolo RLP funciona basicamente utilizando-se de 03 (três) parâmetros, que são: *i*) número máximo de tentativas de retransmissões permitidas antes de ser abortado a tentativa de recuperação, *ii*) um contador do número de NAK enviados por cada quadro, e *iii*) um tempo pré-determinado que controla o temporizador de solicitação de novas retransmissões de cada quadro.

Quando o lado receptor recebe um quadro com erro ou quando um quadro está faltando, ele envia de volta um NAK requisitando a retransmissão desse quadro. Um temporizador é iniciado para cada quadro faltante e quando o temporizador expirar pela primeira vez ele é reinicializado, sendo enviados então dois NAK. Cada NAK recebido no transmissor gera uma requisição de retransmissão do quadro. Quando o temporizador expirar pela segunda vez ele é novamente reinicializado e enviado três NAK. Este processo continua até que o número de expirações do temporizador atinja o limite  $n$  (o valor padrão é  $n = 3$ ), conforme recomendado em [EIA95]. A retransmissão do quadro é abortada após as  $n$  tentativas de retransmissão. Neste caso, a tarefa de recuperação do quadro faltante passa a ser da camada TCP, que tenta recuperar o quadro através de um outro mecanismo ARQ.

## 5.2. Análise de Desempenho da Camada do Protocolo RLP

Nesta seção, faz-se uma análise somente dos resultados obtidos nas simulações de desempenho da camada do protocolo RLP, não fazendo, por enquanto, uma interação com a camada do protocolo TCP.

As simulações foram baseadas na operação do protocolo RLP, conforme descrita na Seção 5.1.

Para simulações consideramos os seguintes parâmetros:

- Atraso de propagação do quadro no canal de 100 ms;
- Consideração do tempo estimado para a retransmissão do quadro de 300 ms;
- Tamanho do quadro RLP de 192 bits;
- Número máximo de retransmissões ( $n = 4$ ).

Também se considera dois modelos básicos de canal, conforme apresentados no Capítulo 03. Os modelos utilizados no processo de simulação são o equiprovável, conforme Seção 3.2, onde a taxa de erro do quadro na camada RLP é considerada fixa, ou seja, a probabilidade de sucesso ou falha na transmissão de um quadro RLP é independente ao quadro anteriormente transmitido [BAO96].

Outro modelo de canal utilizado nas simulações, conforme descrito em [VUK01], onde apesar de ser um modelo simples, aproxima-se do modelo do canal utilizado no CDMA.

Para efeito de análise, consideramos 03 (três) tipos de resultados, que são: *i*) probabilidade de erro de quadro, *ii*) o desempenho da vazão de dados da camada de enlace de rádio e, *iii*) o atraso médio do quadro.

### 5.2.1. Análise da Probabilidade de Erro do Quadro

Na ferramenta para simulação, a análise probabilística de erro é efetuada na relação de quadros abortados, não sendo utilizado nenhuma forma de detecção e correção de erros pela camada física, mas sim na probabilidade da verificação do quadro por completo ser abortado na transmissão, sendo desta forma detectada pela camada do protocolo RLP.

Para estimar a probabilidade de erro do quadro utilizamos a relação,



$$P_{rlp} = \frac{A_q}{T_q}, \quad (5.1)$$

onde  $A_q$  é a quantidade de quadros RLP abortados depois de se esgotarem todas as tentativas de recuperação com retransmissão e  $T_q$  o total de quadros transmitidos. No processo de simulação utilizou-se um tempo total de transmissão de 120 minutos, pelo qual o canal em condições normal, sem a ocorrência de erros, tem a capacidade de transmissão de aproximadamente 360.000 quadros do protocolo RLP no tempo utilizado para simulação.

A estimativa da probabilidade de erro dos quadros tem forte influência no cálculo e análise em relação aos outros resultados a serem obtidos, como a vazão de dados e o atraso médio dos quadros, tanto do protocolo RLP quanto do protocolo TCP. Deve-se a isso o fato de existirem dois mecanismos para que o quadro seja descartado e não considerado para a análise dos resultados. Os quadros são abortados quando transmitidos com erro e quadros são apenas descartados quando recebidos corretamente, porém duplicados. Neste caso somente um quadro é considerado para efeito de cálculo, sendo os duplicados apenas descartados, não sendo computados para análise da vazão de dados e probabilidade de erro dos quadros.

As Figura 5-3 e Figura 5-4 apresentam as probabilidades de um quadro ser abortado (quadros transmitidos com erro) com o número de retransmissões efetuadas sob diversas taxas de erro de quadro.

Em ambos os gráficos, são ilustrados a probabilidade de erro do quadro RLP utilizando-se dos modelos de canal equiprovável e com surtos de erro. Através deles percebe-se a forte influência que a quantidade de retransmissões exerce sobre a probabilidade de um quadro ser abortado, onde a medida que a taxa de erro do quadro aumenta, a tendência de quanto maior o número de retransmissões forem permitidas menor a probabilidade de erro do quadro.

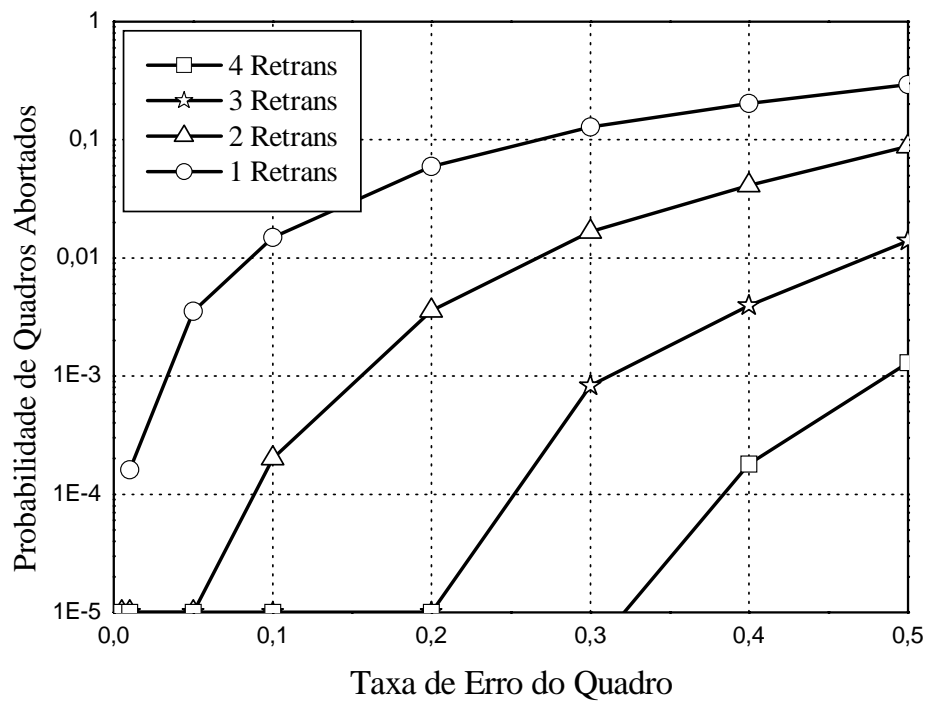


Figura 5-3: Probabilidade de erro do quadro RLP no modelo do canal equiprovável

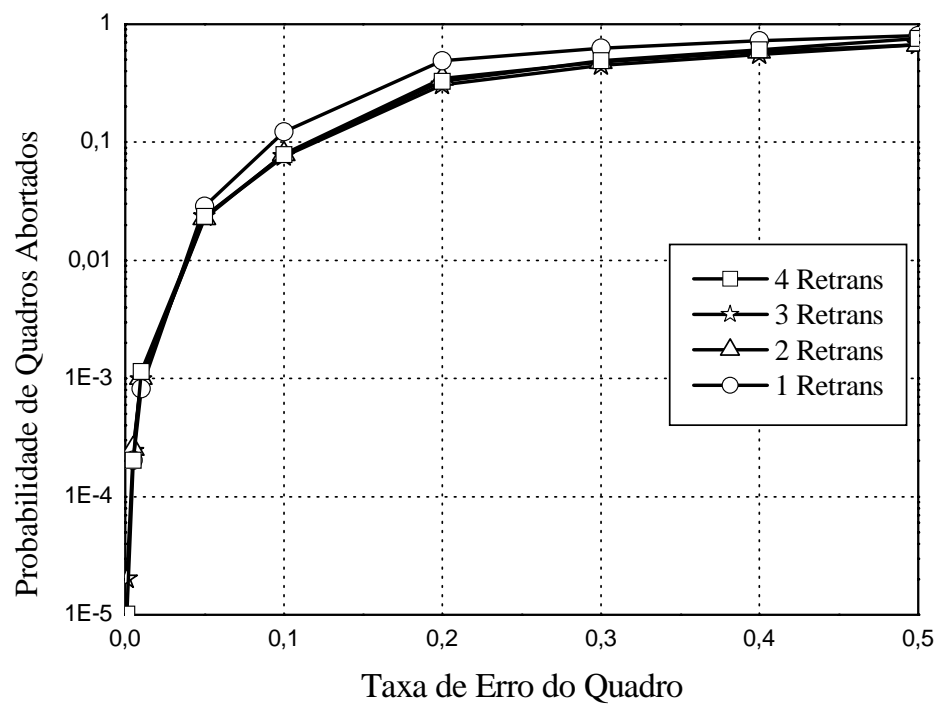


Figura 5-4: Probabilidade de erro do quadro RLP no modelo do canal com surtos de erro

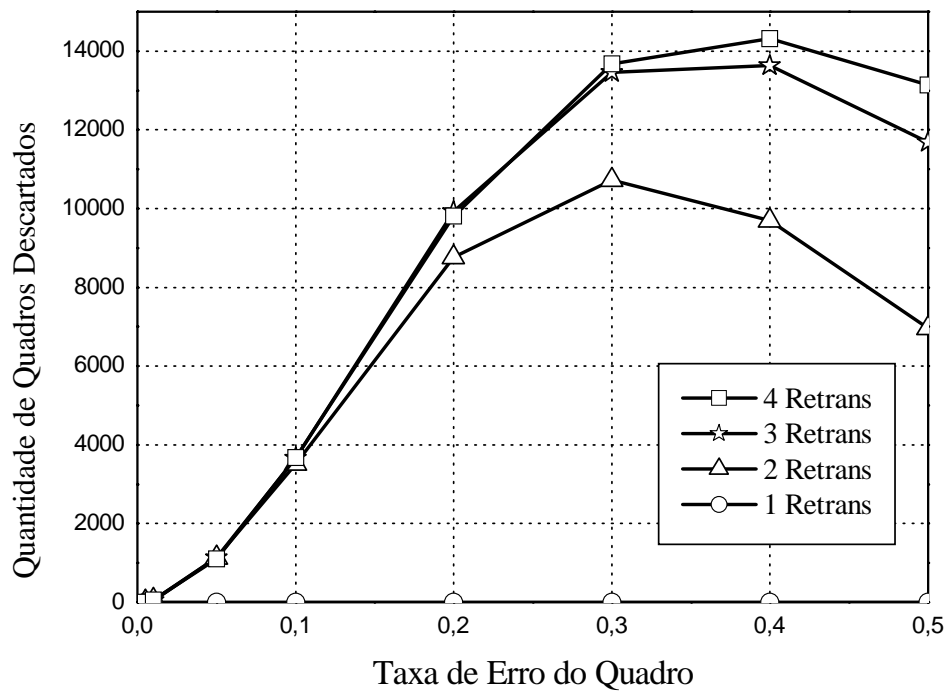


Figura 5-5: Quantidade de quadros descartados no modelo do canal equiprovável

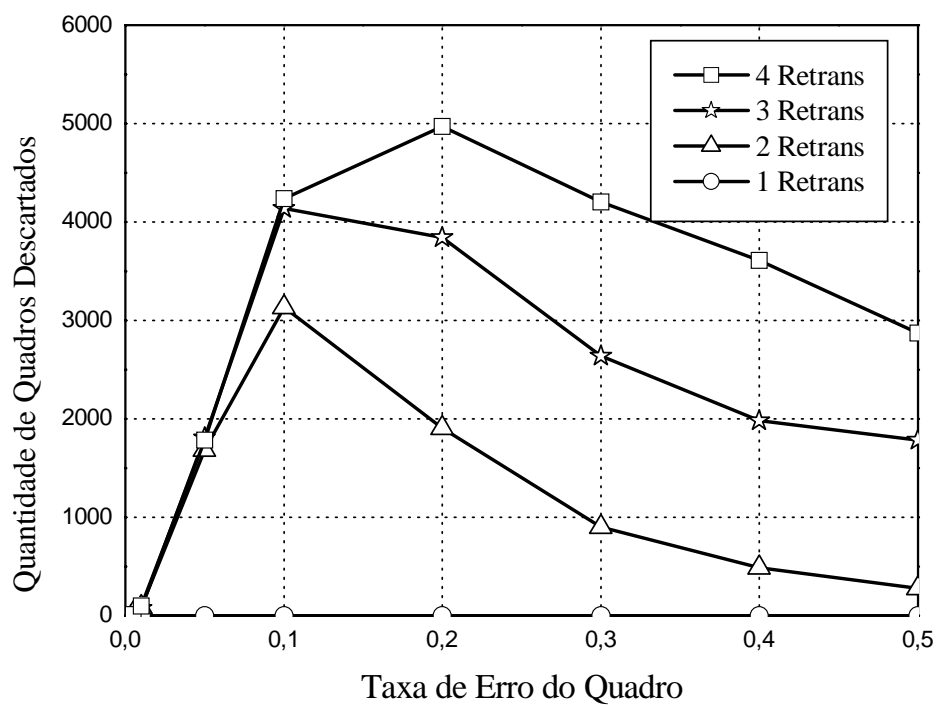


Figura 5-6: Quantidade de quadros descartados no modelo do canal com surtos de erro

As Figura 5-5 e Figura 5-6 ilustram a quantidade de quadros RLP descartados sob diversas taxas de erro de quadro. Esses resultados tornam-se essenciais para futuras análises,

pois através deles conseguimos fazer uma análise mais apurada dos melhores mecanismos e parâmetros a serem utilizados na transmissão, como por exemplo, o número máximo de retransmissão a ser utilizada pela camada do protocolo RLP. Em cálculos analíticos, tendo em vista que essa característica não é levada em conta, na análise dos resultados, quanto maior o número de retransmissões maior a sua vazão de dados a ser alcançada. No processo de apuração dos resultados através de resultados obtidos pela ferramenta de simulação, essa característica nem sempre é verdadeira, pois dependendo da quantidade de erros no canal, quando o número de retransmissões é muito elevado, o número de quadros descartados também será elevado, diminuindo dessa forma a sua vazão de dados.

### 5.2.2. Análise da Vazão de Dados RLP

Depois da análise realizada na Seção 5.2.1, segue uma análise de um parâmetro muito importante de eficiência para a camada RLP, que é a sua vazão de dados.

É definido como vazão de dados da camada do protocolo RLP,  $V_{rlp}$ , a quantidade de bits recebidos em uma determinada fração de tempo, conforme equação (5.2),

$$V_{rlp} = \frac{R_{rlp} \cdot 192}{T_{rlp}}, \quad (5.2)$$

onde  $R_{rlp}$  é a quantidade de quadros recebidos com sucesso pela camada do protocolo RLP. A quantidade de bits do protocolo RLP é de 192 bits. Defini-se como  $T_{rlp}$  a fração do tempo de início da transmissão até o tempo final da transmissão dos quadros. Para efeito de cálculo da vazão de dados, consideram-se também os bits relacionados ao cabeçalho do quadro RLP.

Para análise de desempenho da camada do protocolo RLP utilizamos o método *Selective Repeat* de controle ARQ na camada do protocolo TCP. Desta forma o processo de simulação efetuou-se não apenas utilizando a camada física (modelo do canal) e a camada de enlace, mas também a camada do protocolo TCP. É importante ressaltar que a camada TCP pouco influenciou nos resultados obtidos referente a camada do protocolo RLP, pelo fato dela ter sido utilizada no processo de simulação apenas para geração de segmentos TCP para posterior geração dos quadros RLP. Porém, ver-se-á adiante que a camada RLP influenciará diretamente o desempenho do protocolo TCP.

Outra consideração importante refere-se ao modelo do cálculo da vazão de dados, onde a estimativa da vazão de dados efetuada em bits por segundo é tomando por base apenas com os quadros recebidos com sucesso e não são quadros repetidos. Desta forma, caso ocorra falha em um quadro transmitido, a sua retransmissão é solicitada. Assim, quando da retransmissão de dois, três ou quatro quadros, dependendo da situação do canal e da quantidade máxima de retransmissões permitida, poderão ocorrer a situação em que um mesmo quadro seja recebido com sucesso várias vezes. Desta forma, somente um quadro será enviado para a fila de recepção de quadros recebidos RLP e os quadros subsequentes serão descartados. Portanto, quadros descartados não serão computados para o cálculo da vazão de dados, pois, visto acima, o cálculo é efetivado apenas com a divisão da quantidade de bits recebidos e posteriormente aproveitados, pelo tempo gasto desde o início da transmissão.

Desta forma difere-se o modelo do cálculo no processo de simulação pela ferramenta de simulação quando comparada a forma analítica, conforme descrito em [BAO96], pois na forma analítica, considera-se todos os quadros RLP recebidos corretamente para o cálculo da vazão de dados, não sendo considerado se o quadro é repetido ou não. Os resultados da vazão de dados obtidos em simulação pela ferramenta tendem a ser menores a comparadas aos resultados analíticos devido a essa forma de implementação do modelo de cálculo, conforme comentado na Seção 5.2.1.

As Figura 5-7 e Figura 5-8 ilustram os resultados obtidos em bits por segundo da vazão de dados no processo de simulação da camada do protocolo RLP nos modelos de canal equiprovável e no modelo de surtos de erro, respectivamente.

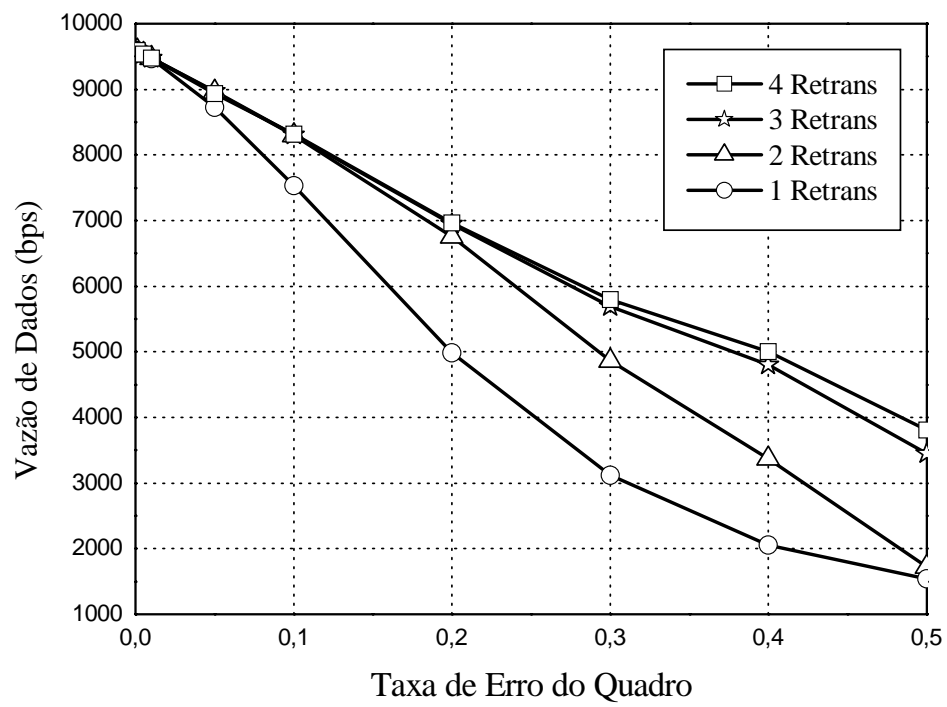


Figura 5-7: Vazão de dados no modelo equiprovável

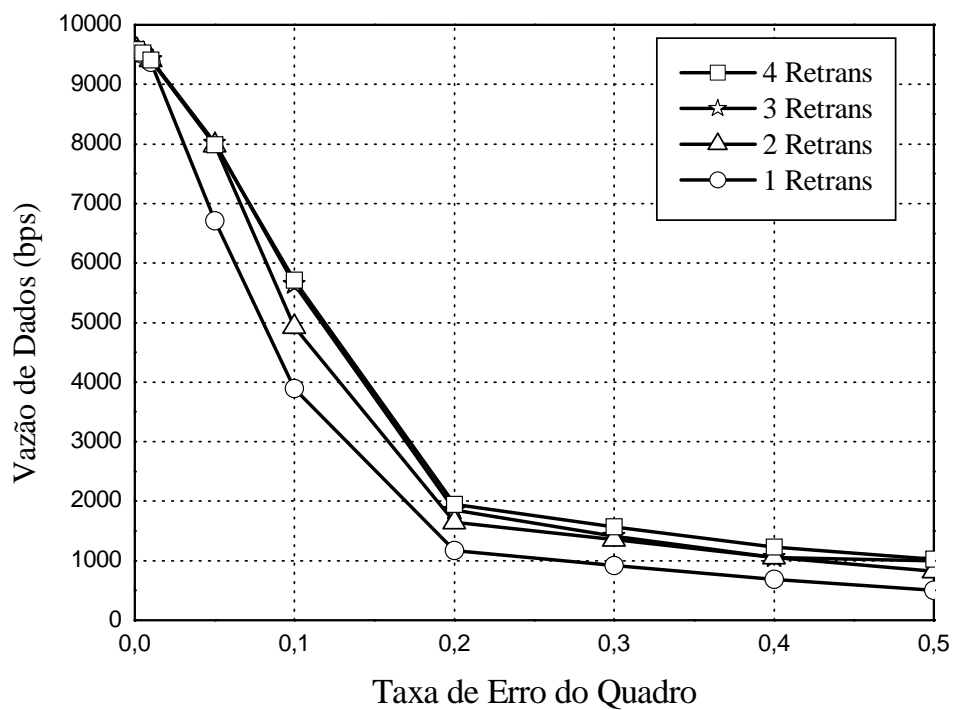


Figura 5-8: Vazão de dados no modelo de surto de erros

Na Figura 5-7 observa-se, para o modelo de canal equiprovável, a medida que se aumenta o valor da taxa de erro do quadro, o seu desempenho é reduzido de uma forma linear, porém o desempenho tende a aumentar a medida que se aumenta o número de retransmissões efetuadas pelo protocolo RLP. Outra constatação importante refere-se a quantidade de retransmissões ( $n = 3$ ) e ( $n = 4$ ), onde constatou-se que o desempenho tende ser praticamente igual um ao outro com relação a taxa de vazão de dados. Desta forma podemos afirmar que para o modelo de canal equiprovável a quantidade ( $n = 3$ ) é melhor que ( $n = 4$ ), pelo fato de ter praticamente o mesmo desempenho, porém o atraso médio dos quadros para ( $n = 4$ ) é superior ao ( $n = 3$ ), conforme Seção 5.2.3.

Na Figura 5-8 observa-se, para o modelo do canal com surtos de erro, que de maneira similar ao modelo equiprovável, a vazão de dados da camada do protocolo RLP tende a melhorar quando eleva-se o seu número de retransmissões com altas taxas de erro no canal. A proporção que se aumenta a taxa de erro do quadro, seu desempenho tende a ficar bem menor comparado ao modelo equiprovável, isto devido a probabilidade maior do quadro subsequente ser transferido com erro também.

### **5.2.3. Análise do Atraso Médio dos Quadros RLP**

Define-se por atraso médio dos quadros o intervalo de tempo em que é iniciada a transmissão do quadro RLP até o tempo final em que ele é recebido com sucesso ou abortado. Também se leva em conta, no que tange ao procedimento de simulação, alguns parâmetros da norma EIA/TIA/IS-95 que define que o atraso no canal de enlace de rádio CDMA é fixo, sendo seu valor de 100 ms.

O atraso médio dos quadros RLP, à proporção que se aumenta o número de retransmissão, tende a aumentar. Isso se deve ao fato na modelagem para a obtenção dos resultados, fazer distinção entre quadros recebidos com sucesso e que serão aproveitados pelas camadas superiores e quadros recebidos com sucesso e que posteriormente serão descartadas e não passados para a camada de transporte.

A Figura 5-9 demonstra o resultado do atraso médio dos quadros no modelo de erro fixo e independente. Desta forma, percebe-se que as linhas que definem o número de retransmissões nesse modelo tendem a ter praticamente o mesmo atraso, porém com o aumento do número de retransmissões percebe-se um pequeno aumento no atraso médio dos quadros. A diferença maior constata-se com a utilização de apenas uma retransmissão, à medida que se aumenta a taxa de erro do quadro, tende a ficar menor em relação à utilização

de mais retransmissões. Isto se deve ao fato de que quanto maior a taxa de erro e menor o número de retransmissão, menor a probabilidade da recuperação do quadro. Desta forma o quadro deverá ser abortado mais rapidamente em relação à utilização de mais retransmissões, diminuindo dessa forma o seu atraso médio, mas aumentando-se a sua probabilidade de erro, discutida na Seção 5.2.1.

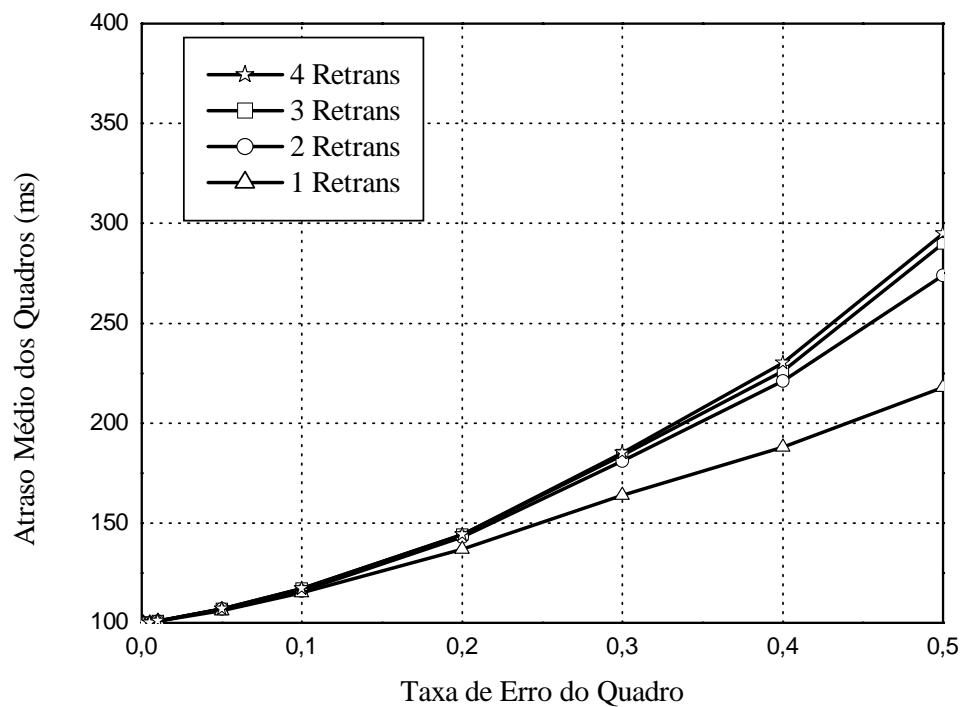


Figura 5-9: Atraso médio dos quadros no modelo do canal equiprovável

Analisando-se apenas o atraso médio da camada de enlace, tenderíamos a adotar a transmissão com apenas uma retransmissão como sendo a melhor estratégia a ser adotada. Porém, como o objetivo da avaliação é aumentar o desempenho da camada de transporte (TCP), essa relação de menor atraso poderá não refletir em ganho de desempenho nas camadas superiores. À medida que os quadros RLP são abortados, é imediatamente passado o controle para o TCP, que então solicitará uma nova retransmissão de seu segmento. Como discutido na Seção 4.3, caso apenas um quadro RLP não seja transmitido com sucesso, todo o segmento TCP ao qual pertence o quadro RLP será abortado e retransmitido.



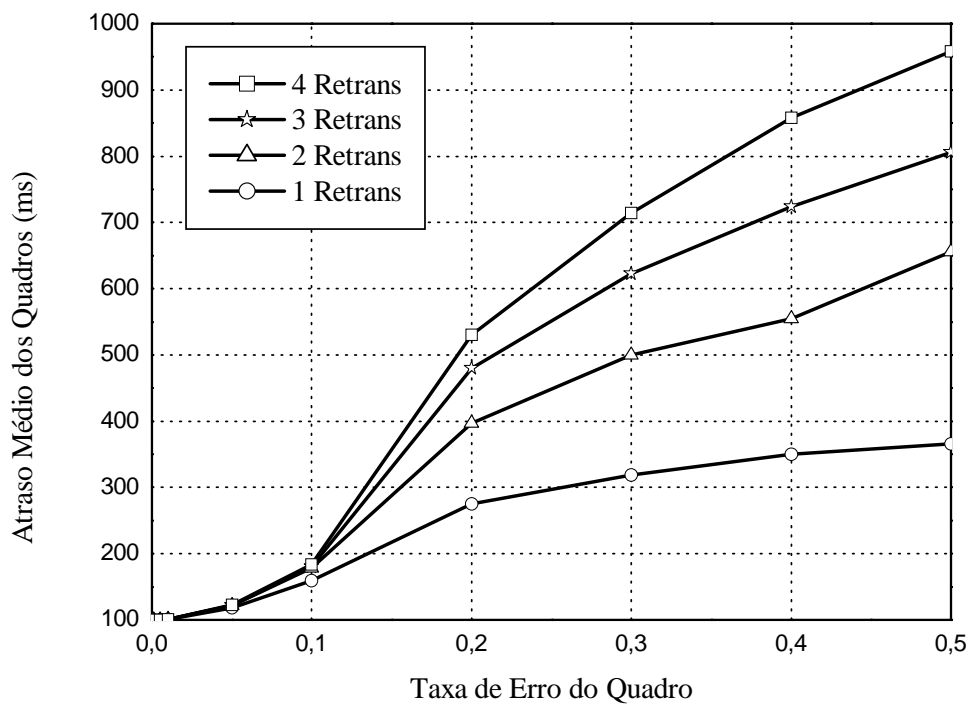


Figura 5-10: Atraso médio dos quadros no modelo do canal com surtos de surto

Com relação a Figura 5-10 que demonstra os resultados obtidos na simulação utilizando o modelo do canal com surtos de erro, a variação do atraso médio do número de retransmissões tende a ficar maior, pois à medida que se aumenta a taxa de erro do quadro, a probabilidade de erro nos quadros subsequentes ao quadro inicial tende a aumentar. Portanto a tendência é quanto maior a taxa de erro, maior o número de retransmissões que deverão ser efetuadas para a recuperação do quadro.

### 5.3. Análise de Desempenho da Camada TCP

O desempenho da camada do protocolo TCP é influenciado diretamente pela camada de enlace (neste caso pelo protocolo RLP). Porém, algumas características na implantação do protocolo TCP poderão aumentar o seu desempenho.

Neste processo de simulação, as características do protocolo TCP foram devidamente implementadas, sendo que, durante a fase de simulação, foram efetuados os controles para entrega confiável dos dados através de mecanismos de controle ACK, controle de reordenação dos pacotes quando entregues fora de ordem seqüencial, controle de fluxo fim a fim com a utilização do conceito de janelas deslizantes e controle de congestionamento imposto pelo transmissor.

De maneira similar às simulações efetuadas do protocolo RLP, considera-se também o cenário de grande quantidade de dados constantemente transferida entre uma estação base e uma estação móvel. Para cada pacote TCP, a cada interação do simulador e geração de novos pacotes TCP, é efetuado o cálculo para estipular quantos quadros RLP são necessários para transportar o pacote TCP, conforme discutido na Seção 4.3.

Dos parâmetros utilizados e seguindo o procedimento da norma IS-99, considera-se dois tipos de tamanho para segmentos TCP (MSS), no qual utiliza-se o tamanho recomendado pela norma de 536 bytes e também o tamanho de 1072 bytes para uma estimativa e comparação do desempenho entre dois tamanhos distintos de segmento.

Para controle e detecção de erros, aplica-se duas principais categorias de esquema ARQ, que são:

- *Stop-and-Wait*;
- Modelo de janelas deslizantes.

Como discutido anteriormente, o esquema *Stop-and-Wait* é um procedimento de controle simples, porém ineficiente na maioria dos casos no que tange ao desempenho na transmissão dos dados. No mecanismo de janelas deslizantes, para cada segmento TCP é designado um número seqüencial e os dados poderão ser encaminhados sem a necessidade de espera de uma confirmação de recebimento do pacote, dependendo do tamanho da janela imposta pelo lado receptor, conforme discutido na Seção 2.2.2. Os esquemas de ARQ utilizados com o mecanismo de janelas deslizantes são o *Go-back-N* e *Selective Repeat*.

### 5.3.1. Análise da Vazão de Dados TCP

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com relação à simulação da vazão de dados do protocolo TCP em uma comunicação fim a fim utilizando-se do protocolo RLP para aumento da sua eficiência.

É definido como vazão de dados da camada do protocolo TCP,  $V_{tcp}$ , a quantidade de bits recebidos por segundo que se consegue remontar sem erros após a camada RLP fazer o encaminhamento à camada do protocolo TCP em uma determinada fração de tempo, conforme equação (5.3),

$$V_{tcp} = \frac{R_{tcp(bits)} \cdot (R \cdot (T_q(bits) - O_{rlp(bits)}))}{T}, \quad (5.3)$$

onde  $R_{tcp}$  é a quantidade de segmentos TCP recebidos,  $R$ , conforme equação (4.3), definido como quantidade de quadros RLP necessários para transportar um pacote TCP,  $T_q$  conforme Seção 4.3, definido como o tamanho do quadro em bits e  $O_{rip}$  como a quantidade de bits destinado ao cabeçalho do quadro RLP.

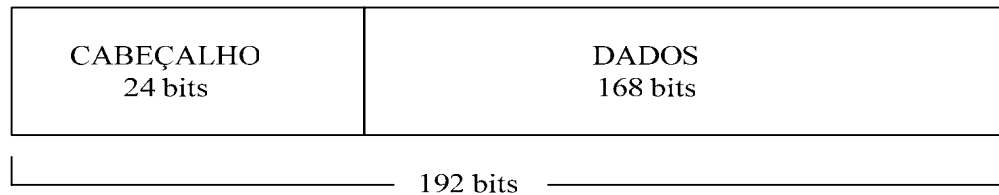


Figura 5-11: Quadro do protocolo RLP

Desta forma, considera-se apenas 168 bits destinados para dados do total de 192 bits do quadro RLP, conforme Figura 5-11, onde pode-se afirmar, conforme equação (5.3), que a vazão máxima da camada do protocolo TCP, utilizando-se uma transmissão de dados em enlaces sem fio CDMA IS-95 pela norma IS-99, será de 8400 bps (considerando o canal de rádio livre de erros).

#### 5.3.1.1. Implicação do Número de Retransmissões da Camada RLP

Nesta seção, analisando-se os resultados obtidos nas Figura 5-12 e Figura 5-13, fazemos algumas considerações quanto ao desempenho da camada do protocolo TCP e nas interações com a camada do protocolo RLP, demonstrando a influência proporcionada no desempenho do sistema com relação à utilização de retransmissões efetuadas pela camada do protocolo RLP.

Para análise dos resultados, utilizamos a seguinte configuração quanto à camada do protocolo TCP:

- Modelos do canal de rádio equiprovável e modelo de surtos de erro;
- Mecanismo para controle de erro ARQ no modelo *Stop-and-Wait*;
- Tamanho fixo do segmento TCP de 536 bytes.

A vazão máxima de dados com esta configuração é de aproximadamente 7000 bps, pelo fato de utilizar-se do modelo de controle de erro *Stop-and-Wait*, onde o tempo de retardo

para a confirmação do pacote TCP diminui a capacidade geral de transmissão do sistema. Outras formas de controle de erro a fim de aumentarmos o ganho do desempenho serão discutidas na Seção 5.3.1.2.

A Figura 5-12 ilustra o resultado obtido em bits por segundo da vazão de dados no processo de simulação da camada do protocolo TCP no modelo do canal com a taxa de erro fixa e equiprovável dos quadros, utilizando-se de controle de erro o modelo *Stop-and-Wait*.

Neste modelo, percebe-se a forte influência que a quantidade de retransmissões na camada do protocolo RLP exerce sobre a vazão de dados do protocolo TCP. À medida que a probabilidade de erro do quadro aumenta e, tratando-se de erros de quadros independentes um do outro, a camada de enlace consegue, através de seus mecanismos de detecção de erros, melhorar significativamente o desempenho da camada do protocolo TCP.

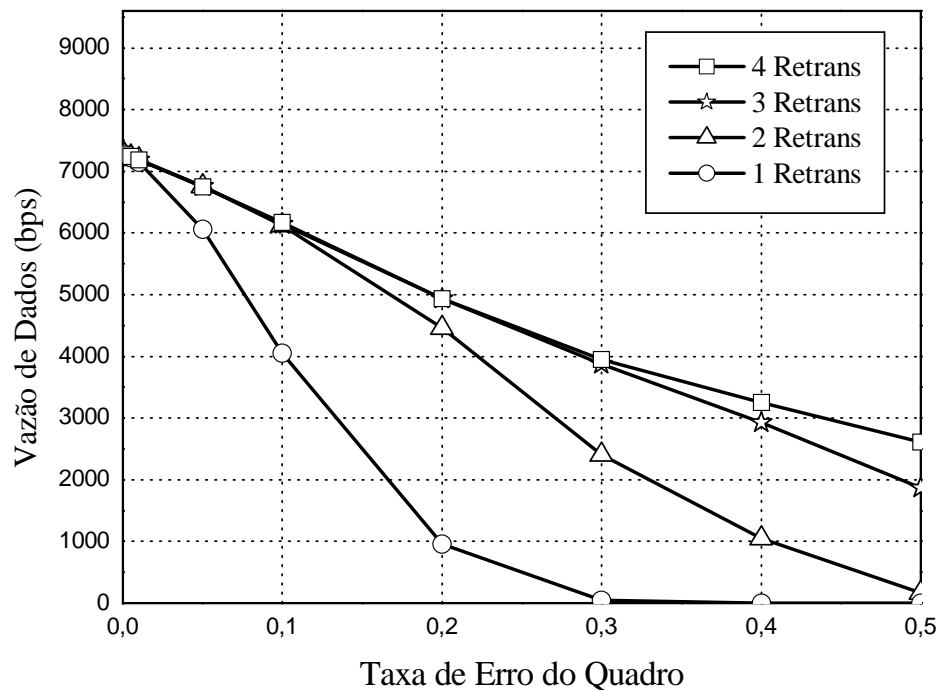


Figura 5-12: Modelo do canal equiprovável e controle de erro *Stop-and-Wait*

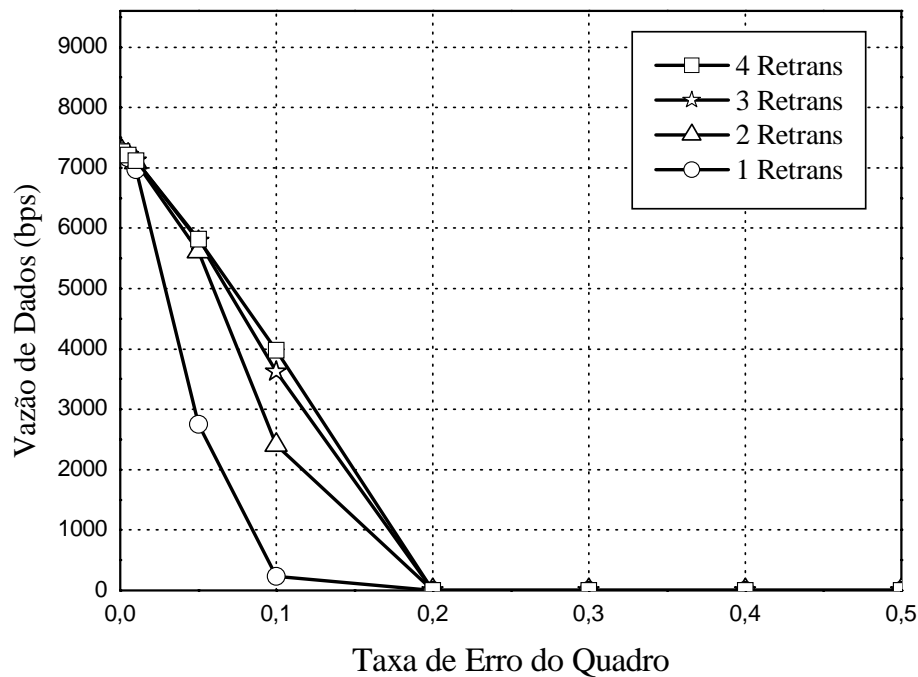


Figura 5-13: Modelo do canal com surto de erros e controle de erro *Stop-and-Wait*

A Figura 5-13 ilustra, o resultado obtido em bits por segundo da vazão de dados no processo de simulação da camada do protocolo TCP no modelo do canal com *surtos de erro* dos quadros, utilizando-se de controle de erro o modelo *Stop-and-Wait*. O valor utilizado para variável  $m$  foi seis, conforme equação (3.5), definindo a probabilidade do canal retornar à situação normal, isto é, sem erros no meio físico.

Neste modelo, tendo a probabilidade maior dos quadros subsequentes ao quadro com erro também serem transmitidos com falha, à medida que se aumenta a taxa de erro do quadro a camada do protocolo RLP não consegue manter a mesma eficiência apresentada no modelo equiprovável de erro. Desta forma, pode-se afirmar que, a partir da hipótese do canal de enlace sem fio apresentar taxa de erro superior a 20%, conforme definição do canal apresentado na Seção 3.4, todos os 05 (cinco) quadros subsequentes ao quadro transmitido com falha irão apresentar erro, diminuindo dessa forma a recuperação dos quadros RLP e aumentando o número de retransmissões dos segmentos TCP.

### 5.3.1.2. Implicações dos Modelos de Esquemas ARQ no Desempenho do TCP

Outro fator importante para uma análise do ganho de desempenho da camada do protocolo TCP são os métodos utilizados para controle de congestionamento e controle de

detecção de erro do tipo ARQ, implantadas na ferramenta de simulação, com a utilização do conceito de janelas deslizantes.

As configurações utilizadas no simulador para coleta dos resultados, conforme demonstram as figuras abaixo, são as seguintes:

- Utilização dos três tipos de controle, que são: *Stop-and-Wait*, *Go-back-N* e *Selective Repeat*.
- Utilização dos tamanhos da janela do lado receptor da transmissão para o caso dos controles *Go-back-N* e *Selective Repeat* com valor mínimo ( $W_{\min} = 1$ ) e ( $W_{\min} = 2$ ) e valores máximos ( $W_{\max} = 4$ ) e ( $W_{\max} = 8$ ).
- Modelos do canal equiprovável e modelo de surtos de erro.
- Quantidade de 03 retransmissões da camada do protocolo RLP, que conforme discutido na Seção 5.2.2, é a melhor quantidade de retransmissão na relação vazão de dados e atraso médio dos pacotes;
- Tamanho do segmento TCP de 536 bytes.

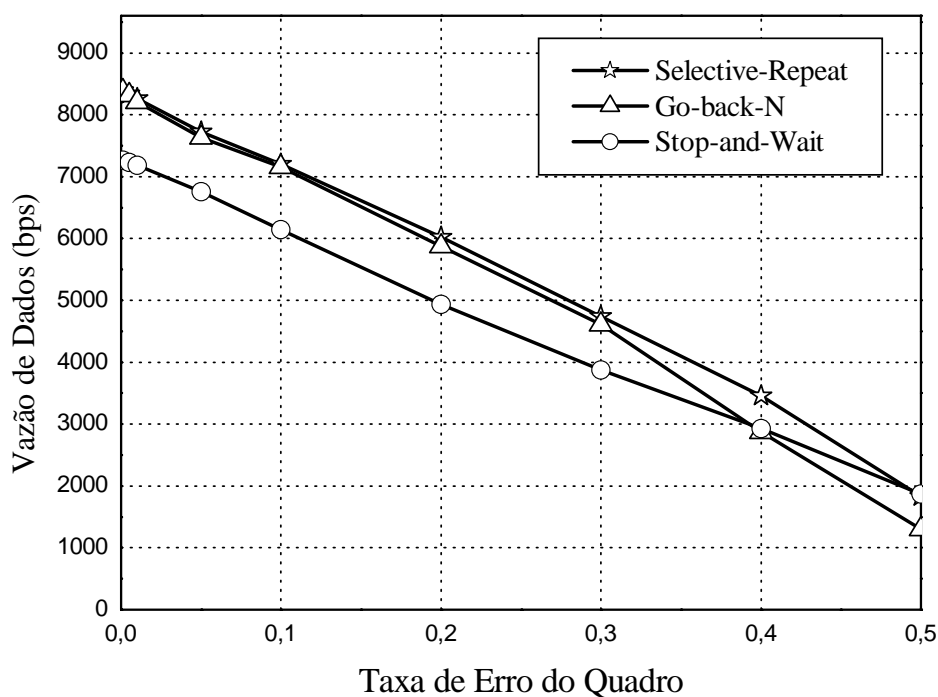


Figura 5-14: Modelo do canal equiprovável para ( $W_{\min} = 1$ ) e ( $W_{\max} = 4$ )

A Figura 5-14 mostra a vazão de dados do protocolo TCP utilizando-se dos três modelos de controle de ARQ, que são: *Stop-and-Wait*, *Go-back-N* e o *Selective Repeat*. Para

obtenção dos resultados foi empregado o modelo do canal equiprovável de erro, utilizando-se, nos casos específicos dos esquemas *Go-back-N* e *Selective Repeat* uma janela mínima ( $W_{\min}$ ) de 01 (um) segmento e máxima ( $W_{\max}$ ) de 04 (quatro) segmentos.

A Figura 5-14 ilustra que o modelo de controle de fluxo *Stop-and-Wait* é menos eficiente, enquanto que os modelos *Go-back-N* e *Selective Repeat*, para o caso específico do modelo do canal equiprovável, se equivalem enquanto a taxa de erro do quadro é pequena. Porém, quando a quantidade de erros aumenta e há necessidade de um número maior de retransmissão por parte do protocolo TCP, o modelo *Selective Repeat* mostra-se mais eficiente comparado ao modelo *Go-back-N*, devido as suas características de implementação, conforme apresentado na Seção 4.4.3.

De maneira similar aos parâmetros utilizados na coleta de resultados da Figura 5-14, mas agora utilizando-se do modelo de canal de surtos de erro, a Figura 5-15 ilustra a influência da utilização dos 03 (três) modelos quando se aumenta a probabilidade da taxa de erro de quadro.

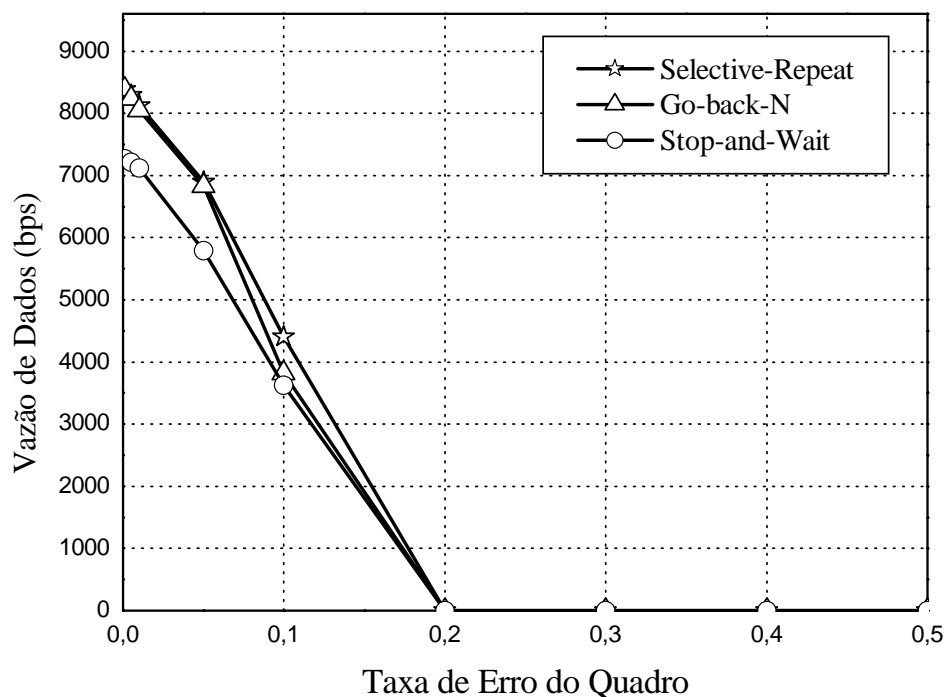


Figura 5-15: Modelo de canal com surto de erro para ( $W_{\min} = 1$ ) e ( $W_{\max} = 4$ )

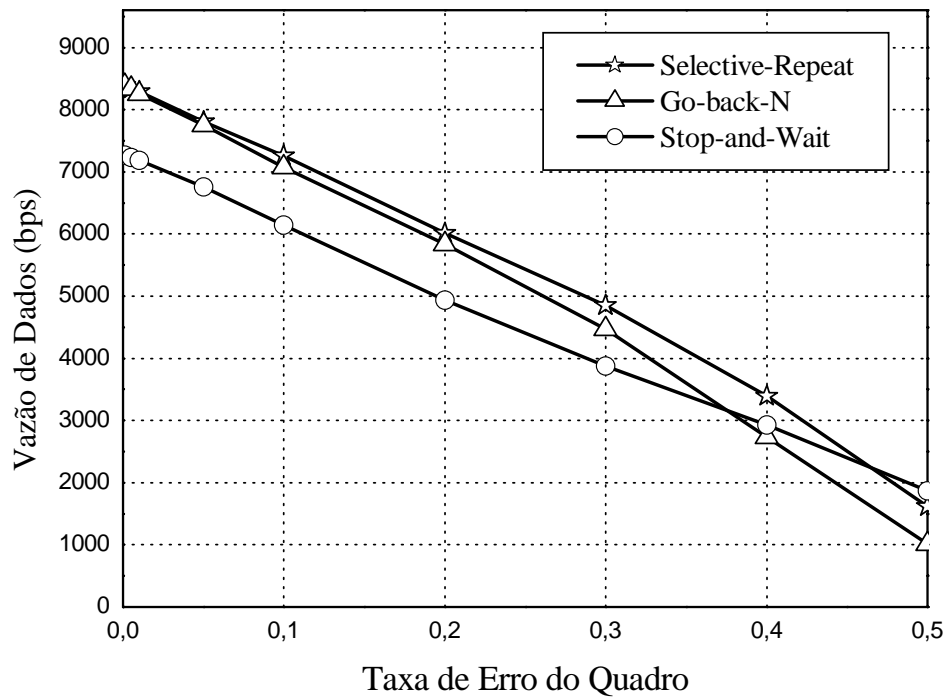


Figura 5-16: Modelo do canal equiprovável para ( $W_{\min} = 2$ ) e ( $W_{\max} = 8$ )

Semelhante aos resultados apresentados no modelo de canal equiprovável, no modelo de canal com surto de erros a vazão de dados utilizando-se do esquema *Selective-Repeat* consegue um maior desempenho. Já os modelos *Stop-and-Wait* e *Go-back-N*, à medida que a taxa de erro do quadro aumenta, o desempenho da vazão de dados entre os dois modelos é praticamente similar um ao outro.

A Figura 5-16 se diferencia da situação apresentada na Figura 5-14 por possuir o tamanho da sua janela mínima ( $W_{\min} = 2$ ) e sua janela máxima ( $W_{\max} = 8$ ).

Conforme discutido nas Seções 2.2.2 e 2.2.3, o desempenho na transmissão de dados tende a aumentar com a utilização de um tamanho maior das janelas. Tendo em vista que no processo de simulação a transferência dos dados se faz apenas entre uma estação base e uma estação móvel, a influência das janelas no desempenho não se altera muito com relação ao tamanho da janela apresentado na Figura 5-14. Porém, apesar dessa situação, nota-se um pequeno ganho do desempenho geral do sistema com a utilização de um tamanho maior das janelas de advertência.



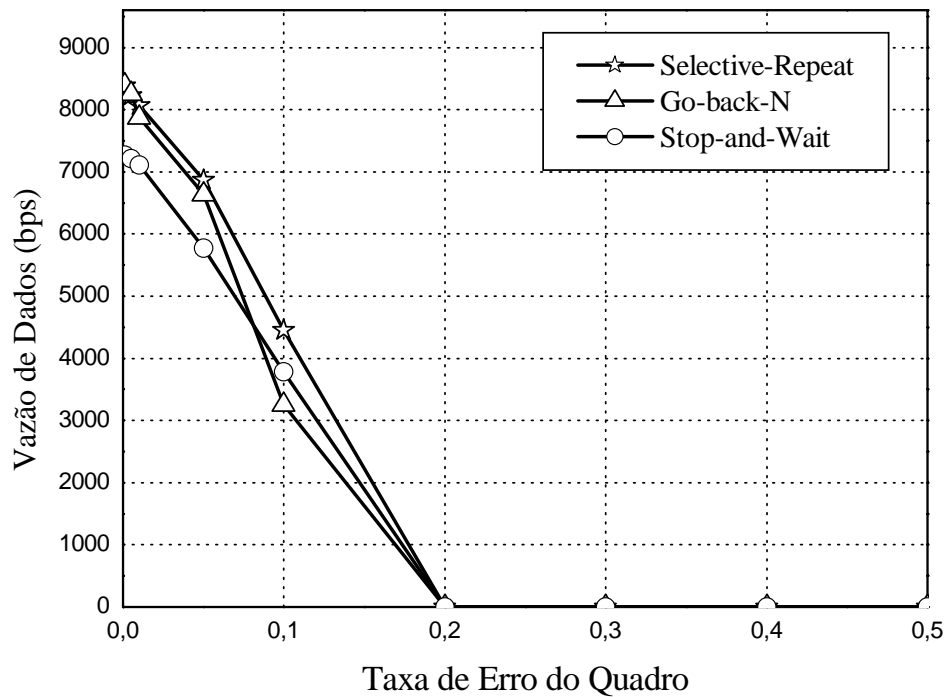


Figura 5-17: Modelo de canal com surto de erros para ( $W_{\min} = 2$ ) e ( $W_{\max} = 8$ )

A Figura 5-17 ilustra o desempenho da vazão de dados com o modelo de surto de erros, no qual demonstra também que a utilização do modelo *Selective-Repeat* é também a melhor técnica a ser utilizada, independente do modelo do canal e do tamanho da janela a serem utilizadas.

Neste caso específico da Figura 5-17, a utilização do modelo *Stop-and-Wait* em determinadas situações do canal passa a ser mais eficiente que a utilização do modelo *Go-back-N*.

### 5.3.1.3. Influência no Tamanho do Segmento TCP

Por definição, conforme especificado em [BAO96] e [EIA95], utilizamos para todo o processo de simulação o tamanho do segmento TCP (MSS) com 536 bytes.

Porém, efetuamos também algumas simulações utilizando como tamanho do segmento TCP 1072 bytes, duas vezes o tamanho sugerido, com o objetivo de analisar a influência do tamanho do segmento TCP no desempenho da vazão de dados do protocolo TCP.

Os parâmetros utilizados para a coleta dos resultados foram os seguintes:

- Modelo de controle de fluxo de dados *Selective Repeat*;
- 03 (três) o número de retransmissões utilizadas na camada do protocolo RLP;

- Modelos do canal equiprovável e modelo de surtos de erro;
- Tamanho dos segmentos TCP (MSS) de 536 bytes e 1072 bytes.

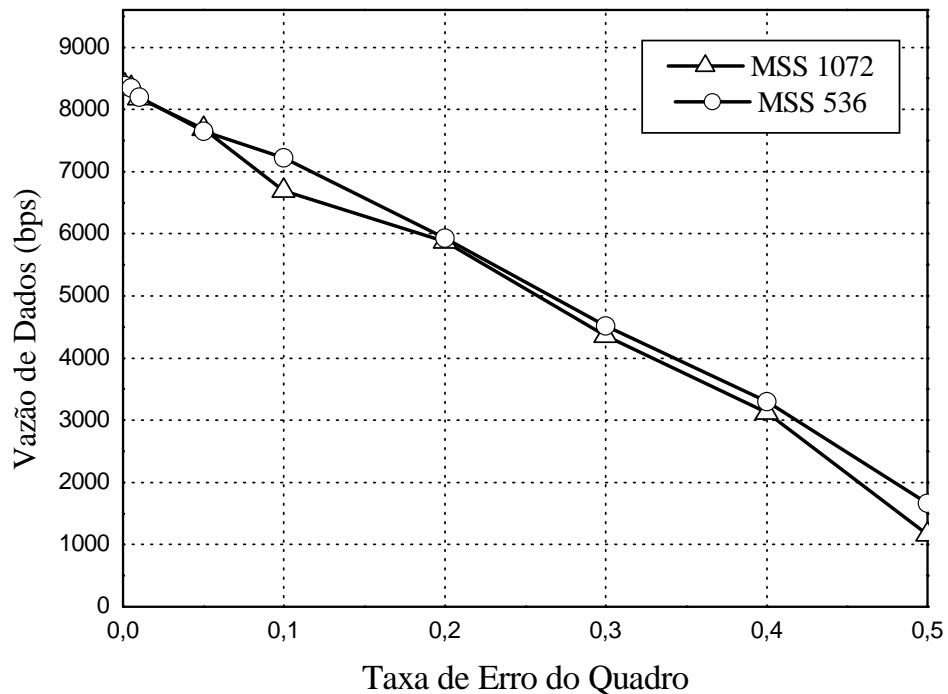


Figura 5-18: Selective Repeat com MSS=536 e MSS=1072

A Figura 5-18 ilustra o desempenho do sistema utilizando do modelo do canal com a probabilidade de erro fixo e equiprovável. Demonstramos que, utilizando o tamanho do segmento do protocolo TCP com 536 bytes, pela qual se baseou todo o processo de simulação, o desempenho do sistema tende a ser melhor que quando da utilização do segmento com o dobro do tamanho utilizado.

Na Figura 5-19, utilizamos o modelo de surtos de erro, e semelhante aos resultados apresentados no modelo do canal equiprovável, o desempenho do sistema tende ser mais eficiente com a utilização de 536 bytes que 1072 bytes.

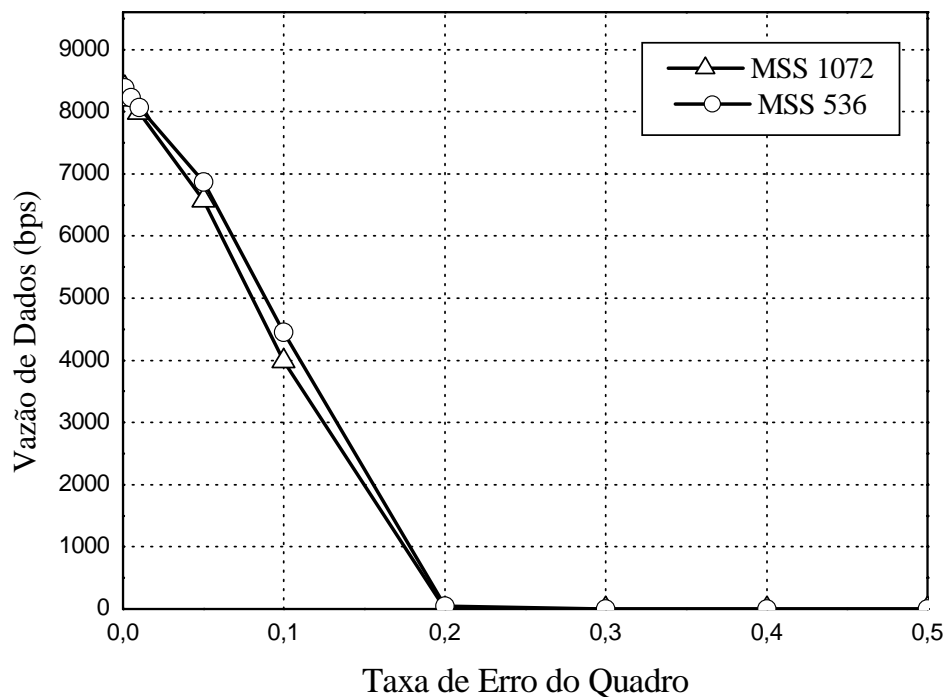


Figura 5-19: Selective Repeat com MSS=536 e MSS=1072

### 5.3.2. Análise do Atraso Médio dos Pacotes TCP

Nesta seção, analisamos o atraso médio dos pacotes TCP com base nos resultados obtidos nas simulações, para qual foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Utilização dos três tipos de controle, que são: *Stop-and-Wait*, *Go-back-N* e *Selective Repeat*;
- Utilização dos tamanhos da janela do lado receptor da transmissão para o caso dos controles *Go-back-N* e *Selective Repeat* com valor mínimo ( $W_{\min} = 2$ ) valor máximo ( $W_{\max} = 4$ );
- Modelos do canal equiprovável e modelo de surtos de erro;
- Quantidade de ( $n = 3$ ) retransmissões da camada do protocolo RLP, que conforme discutido na Seção 5.2.2, é a quantidade de retransmissão que melhora de forma mais eficiente o ganho de desempenho da camada do protocolo TCP;
- Tamanho do segmento TCP de 536 bytes.

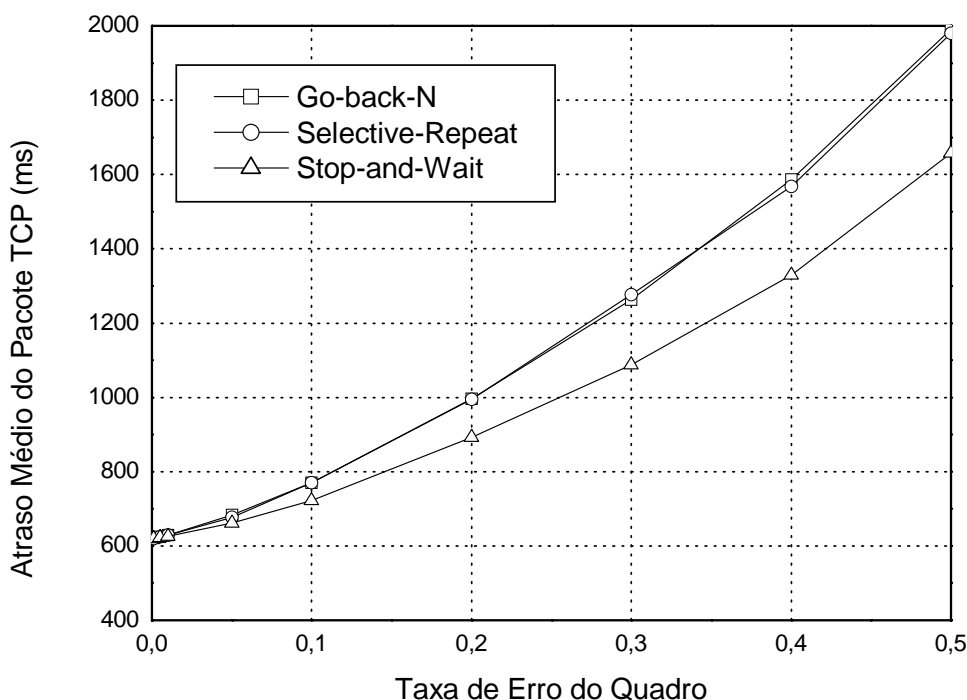


Figura 5-20: Atraso médio TCP no modelo de canal equiprovável

A Figura 5-20 ilustra o atraso médio dos pacotes no modelo de canal equiprovável, onde se percebe que o atraso neste modelo de canal para os métodos de controle *Selective Repeat* e *Go-back-N* são praticamente similares. O atraso médio desses métodos são superiores ao comparado ao método *Stop-and-Wait*.

Um fator que influencia diretamente no atraso médio dos pacotes é o procedimento de retransmissões efetuadas pelo *RTO* (temporizador) do segmento TCP. Como discutido na Seção 4.4.4, esse tempo é determinado principalmente pela estimativa do *RTT* do segmento. Devido ao fato do valor *RTT* ser calculado apenas quando um segmento é transmitido com sucesso, no método *Stop-and-Wait*, a tendência do valor *RTO*, à medida que a taxa de erro do quadro aumenta, é se tornar menor ao comparado com os métodos de controle *Selective Repeat* e *Go-back-N*. Isso se explica pelo fato que nos métodos *Selective Repeat* e *Go-back-N* não há a necessidade de se aguardar a confirmação de recebimento do primeiro segmento transmitido para depois enviar o segundo. Assim, quando a taxa de erro do quadro aumenta e a camada de enlace (protocolo RLP) necessita de retransmissão de quadros transmitidos com falha, poderá ocorrer que o segundo segmento tenha iniciado a sua transmissão e o primeiro segmento ainda não tenha sido recebido com sucesso pelo receptor. Caso o primeiro segmento solicite diversas retransmissões na camada de enlace, o valor *RTT* do segundo segmento tenderá a ficar maior. Como o valor *RTT* influencia diretamente no valor do temporizador do

segmento TCP, desta forma no método *Stop-and-Wait* o mesmo terá o seu reconhecimento mais rápido na falha de transmissão, diminuindo dessa forma o seu atraso médio em relação aos outros métodos. Apesar de todo o procedimento constante de atualização do valor do *RTO*, que permite um valor sempre coerente do temporizador, o tempo médio de transmissão do segmento TCP com altas taxas de erro no método *Stop-and-Wait* se torna menor.

A Figura 5-21 demonstra o atraso médio dos pacotes no modelo do canal com surtos de erro, porém apresentamos somente os valores quando a taxa de erro é inferior a 20%, pois acima desse percentual, discutido na Seção 5.3.1, todos os segmentos serão descartados, não sendo possível assim, obter o seu atraso médio.

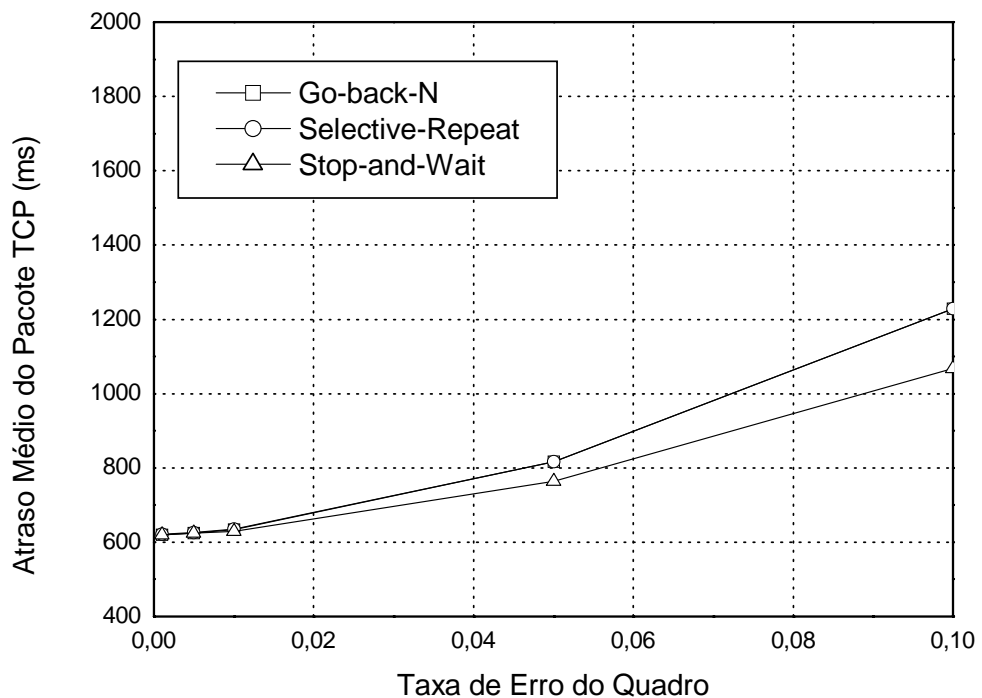


Figura 5-21: Atraso médio TCP no modelo de canal com surtos de erro

### 5.3.3. Análise da Probabilidade de Erro

Para estimar a probabilidade de erro do segmento TCP utilizamos a relação,

$$P_{tcp} = \frac{E_{tcp}}{T_{tcp}}, \quad (5.4)$$

em que  $E_{tcp}$  é a quantidade de segmentos TCP descartados e  $T_{tcp}$  é a quantidade total de segmentos transmitidos.

As Figura 5-22 e Figura 5-23 apresentam as probabilidades de um pacote ser descartado com o máximo número de retransmissões efetuadas na camada do protocolo RLP na tentativa de recuperação dos quadros transmitidos com falha. Utiliza-se o tamanho mínimo de janela ( $W_{min} = 2$ ) e o tamanho máximo da janela ( $W_{max} = 8$ ), utilizando o modelo de controle ARQ *Selective Repeat* sob diversas taxas de erro de quadro.

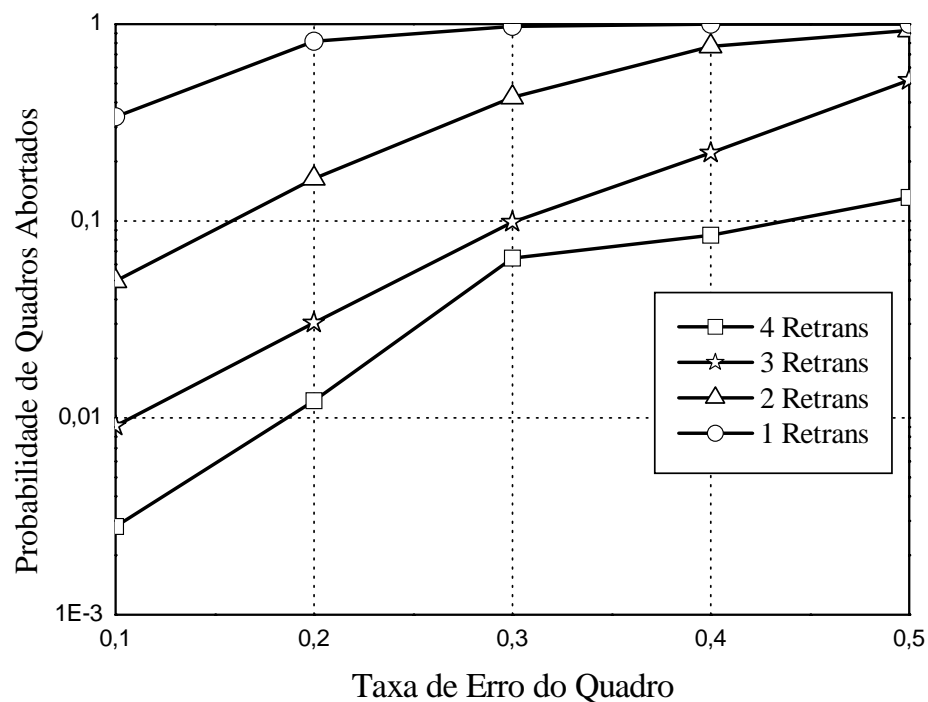


Figura 5-22: Probabilidade de erro do segmento TCP no modelo de canal equiprovável

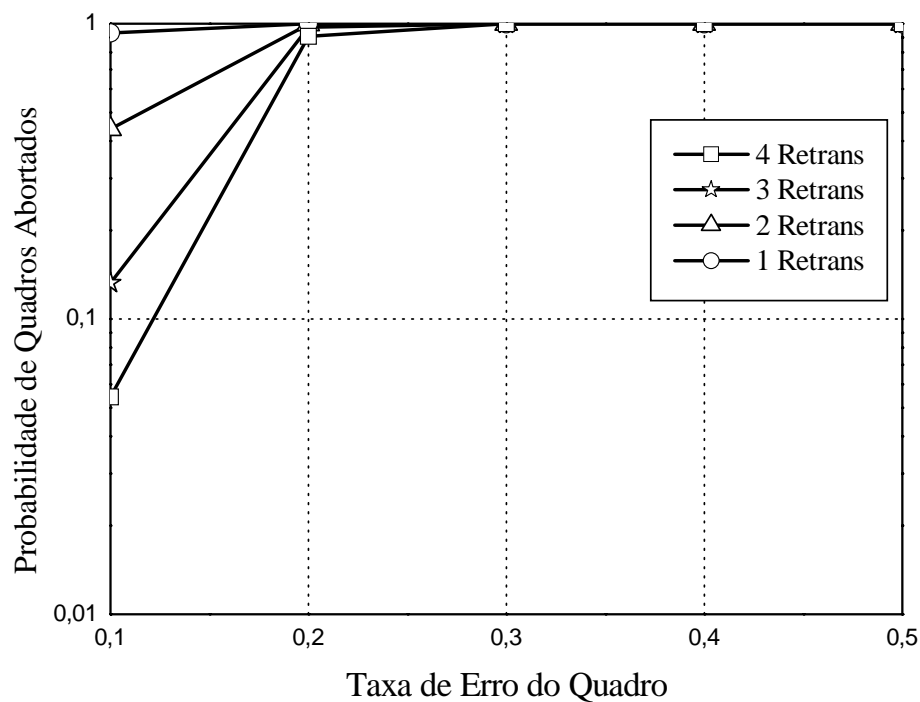


Figura 5-23: Probabilidade de erro do segmento TCP no modelo de canal com surtos de erro

As figuras apresentam os resultados obtidos em simulações, com os parâmetros indicados acima, e representam a probabilidade de erro na transmissão de um segmento TCP sob diversas taxas de erro de quadro.

A importância dos resultados obtidos é que ambos os modelos do canal (tanto no modelo equiprovável quanto no modelo de surto de erro) as retransmissões efetuadas pela camada de enlace desempenham a sua função principal, que é ajudar a reduzir a probabilidade de erro do segmento TCP no canal sem fio, aumentando desta maneira o desempenho da camada do protocolo TCP. Constatamos então que, quanto maior o número de retransmissões, menor a probabilidade de erro do segmento TCP.

## 5.4. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados diversos resultados obtidos no processo de simulação com os parâmetros do CDMA IS-95 e utilizando dois modelos de canal, um modelo equiprovável discutido na Seção 3.2 e outro modelo de canal de surtos de erro, discutido na Seção 3.4. Com relação aos resultados obtidos na camada de enlace, neste caso específico utilizando o protocolo RLP, concluímos que quanto maior o número de

retransmissões maior a sua vazão de dados e menor a probabilidade de erro de quadro.. Porém, com relação ao atraso médio dos quadros, a medida que se aumenta o número de retransmissões o atraso dos quadros tendem a aumentar. Desta forma, através dos resultados obtidos, conclui-se que o melhor parâmetro do número de retransmissões da camada de enlace, para ambos os modelos de canal, é ( $n = 3$ ), onde se alcança uma melhor eficiência em relação à vazão de dados e atraso médio dos quadros.

Com relação aos resultados obtidos com relação a camada de transporte, utilizando-se do protocolo TCP, foram utilizados os três métodos de controle de ARQ, que são o *Stop-and-Wait*, *Go-back-N* e o *Selective Repeat*, sob diversas taxas de erro de quadro e também com nos dois modelos de canais utilizados para a camada de enlace.

Com base nos resultados obtidos, concluímos que, o melhor método de controle de ARQ a ser utilizada pela camada TCP é o *Selective Repeat*, porém sua eficiência não foi maior comprovada em relação aos outros métodos pelo fato de estarmos simulando apenas uma transmissão fim a fim entre uma estação base e uma estação móvel, não sendo possível desta forma simularmos os problemas oriundo da Internet, como por exemplo o congestionamento da rede causado pela passagem do segmento TCP por diversos pontos de acesso ao longo da transmissão.



## Capítulo 6

### Conclusão

Com a crescente necessidade da utilização de transmissão de dados em redes sem fio, utilizando o protocolo TCP com desempenho comparado a redes cabeadas, novos estudos e avaliações estão emergindo na área das comunicações móveis. O objetivo principal desses estudos é viabilizar a troca de informações de forma satisfatória às necessidades das aplicações, principalmente no que tange à troca de informações via Internet. Com essa necessidade, uma ferramenta para simulação de desempenho do protocolo TCP em enlaces de rádio foi proposta, a fim de se obter através de simulações, resultados de desempenho do sistema com a interação de diversos modelos de canal, implementações da camada de enlace e mecanismos de controle do protocolo TCP.

Duas principais camadas que influenciam diretamente o desempenho do sistema em enlaces sem fio são a camadas de transporte (protocolo TCP) e de enlace. Oferece-se uma visão geral dessas duas camadas, com a descrição conceitual e os procedimentos de controle utilizados quando de uma transmissão de dados em rede sem fio.

Outro fator de grande influência no desempenho do sistema é o modelo discreto de canal de rádio. A função principal do estudo dos modelos discretos de canal é simular a distribuição estatística de erros no canal, simplificando dessa forma a análise dos efeitos do desvanecimento do sinal na transmissão de dados. Outro fator importante do modelo do canal é a influência no desempenho dos protocolos de comunicação, onde a partir da simulação com diversos modelos de canal conseguimos escolher as melhores estratégias de controle de erros, principalmente para a da camada de enlace.

A ferramenta de simulação proposta visa atender a necessidade de se conseguir simular diversos ambientes distintos alterando os parâmetros do sistema de forma simplificada. A ferramenta é dividida basicamente em três camadas:

- Camada física, onde se define o modelo discreto do canal a ser utilizado;
- Camada de enlace de dados, que tem por objetivo principal, através de seu mecanismo de fragmentação dos pacotes oriundos das camadas superiores, obter ganho de desempenho do protocolo TCP;
- Camada de transporte, no qual implementam-se todas as funcionalidades do protocolo TCP, incluindo, controle de fluxo fim a fim, controle de congestionamento e transmissão confiável dos dados.

Com base na ferramenta de simulação, apresentamos um estudo de caso, com os parâmetros do sistema especificado na norma EIA/TIA/IS-99 sobre o padrão wireless CDMA IS-95, utilizando-se no processo de simulação de dois modelos distintos de canal, que são o modelo equiprovável e um modelo de surtos de erro proposto em [VUK01], que tem sua implementação próxima ao modelo do canal adotado no sistema CDMA. A partir dos resultados coletados nas simulações, verificamos o desempenho da camada de enlace e camada de transporte (protocolo TCP) sob dois modelos de canal, sendo um modelo equiprovável e outro modelo com surtos de erro. Obteve-se desta forma, em ambas as camadas, resultados como vazão de dados, atraso médio dos pacotes e probabilidade de erro. Desta forma verificamos as implicações que a camada de enlace exerce sobre o protocolo TCP e proporcionou avaliar as melhores estratégias de controle na camada de transporte sob variadas condições do canal.

Trabalhos futuros nesta área incluem principalmente:

- Expansão da ferramenta para utilização de vários canais de rádio simultaneamente, permitindo dessa forma a implementação de outras tecnologias;
- Simulação da transmissão de dados utilizando-se de outras tecnologias, como por exemplo, GSM/GPRS, implementando novos modelo discretos de canal de rádio;
- Na camada de enlace, onde atualmente é efetuada apenas o controle de erros com a utilização do método ARQ, pode-se expandir esse controle para a correção de erros com a implementação do mecanismo FEC, desta forma utilizando-se de um método híbrido entre detecção e correção de erros;

- Estender a ferramenta de simulação para efetuar uma análise além de uma conexão fim a fim entre uma estação base e estação móvel, simulando, por exemplo, o tráfego da Internet, tornando assim o cenário de simulação mais realista.

Desenvolvemos uma ferramenta que permitirá a simulação de comunicação de dados de dados fim a fim entre uma estação móvel e uma estação base. Assumimos também algumas implicações que um sistema sem fio proporciona na transmissão, com a possibilidade de simular diversos modelos de canais. A ferramenta permite também que façamos estudos da implicação que as camadas de enlace e transporte influenciam no desempenho geral da comunicação de dados em enlaces sem fio utilizando-se do protocolo TCP. Uma avaliação apropriada nos permitirá utilizar as melhores estratégias de comunicação de dados em redes sem fio, sob diversas condições de canal, analisando vazão de dados, atraso médio e probabilidades de perdas de pacotes, a fim de conseguir uma aproximação de desempenho as redes cabeadas.

## Referências Bibliográficas

- [BAO96] BAO, G., “Performance evaluation of TCP/RLP protocol stack over CDMA wireless link”, *Wireless networks*, pp. 229-237, 1996.
- [GAR00] GARG, V. K., IS-95 CDMA and cdma 2000: cellular/PCS systems implementation, Prentice Hall, 2000,
- [CHO00] CHOCKALINGAM, A.; BAO G., “Performance of TCP/RLP protocol stack on correlated fading DS-CDMA wireless links”, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 49, Issue 1, Jan., 2000,
- [ZOR95] ZORZI M., R. R. RAO and L. B. MILSTEIN, “On the accuracy of a first-order Markov model for data block transmission on fading channels”, *Proc. IEEE ICUPC’95*, pp. 211-215, Nov., 1995.
- [COM98] COMER, D. E., Interligação em Redes com TCP/IP – Volume I, Editora Campus, 1998.
- [LIN84] S. LIN, “Automatic-Repeat-Request Error Control Schemes, December 1984 – Vol 22, n. 12 – IEEE Communications Magazine.
- [EIA95] EIA/TIA/IS-99, Data services option standard for wideband spread spectrum digital cellular systems, 1995.
- [EIA93] EIA/TIA/IS-95, Mobile station-base station compatibility standard for dual-mode wideband spread spectrum cellular system, 1993.
- [VUK01] VUKOVIC, I. N.; PETTINGET, J.; HARRIS, J. M., “Modeling RF impact on TCP/RLP in IS-95B”, *Vehicular Technology Conference*, 2001. IEEE VTS 53rd, Vol 3, pp. 2142-2146, 2001.

- [JAC90] JACOBSON, V. 1990a. "Modified TCP congestion Avoidance Algorithm", April 30, 1990, end2end-interest mailing list (Apr.)
- [CHO96] CHOCKALINGAM A; ZORZI, MICHELE; MILSTEIN, LAURENCE B.; VENKATARAM, P., "Performance of a Wireless Access Protocol on Correlated Rayleigh Fading Channels with Capture", IEEE Global Communications Conference, London (UK), Nov. 1996.
- [ESM03] ESMAILZADEH, RIA; NAKAGAWA, MASAO, "TDD-CDMA for Wireless Communications", Artech House, 2003.
- [PRA03] PRASAD, RAMJEE; RUGGIERI, MARINA, "Technology Trends in Wireless Communications", Artech House, INC, 2003.
- [SUD98] SUDHIR RAMAKRISHNA and JACK M. HOLTZMAN, "Interaction of TCP and data access control in a integrated voice/data CDMA system", Mobile Networks and Applications 3 (1998) 409-417.
- [NET02] The Network Simulator – ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [ALE01] ALENCAR, MARCELO SAMPAIO, "Sistemas de Comunicações", Editora Érica, 2001.
- [PRO01] PROTZEK, MÁRCIO ANTÔNIO; DESCARDECI, JOSÉ RICARDO, "Comunicações por Satélite – Técnicas de Transmissão, Multiplexação e de Acesso", Revista do Instituto Nacional de Telecomunicações – Telecomunicações – Volume 04 – Número 02 – Dezembro de 2001.
- [LIN03] LIN, H; DAS, S. K., "A New Link Layer Protocol for Wireless Correlated Fading", IEEE Vehicular Technology Conference, Orlando, FL, October 6-9, 2003.
- [JAC88] JACOBSON, V.; "Congestion avoidance and control", In Proceedings of SGCOMM '88 (Stanford, CA, Aug. 1988), ACM.

- [WAN96] Wang and Pao-Chi Chang, "On verifying the first-order Markovian assumption for a Rayleigh fading channel model", *IEEE Transactions on Veh. Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 353-357, May 1996.
- [KEN69] KENNEDY, R. S., *Fading Dispersive Communication Channels*. Wiley-Interscience, New York, 1969.
- [PET96] L. Peterson and B. Davie, *Computer Networks: A Systems Approach*, Morgan Kaufmann Publishers, 1996.