



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciência

Faculdade de Engenharia

Carlos Alberto Leite Bello Filho

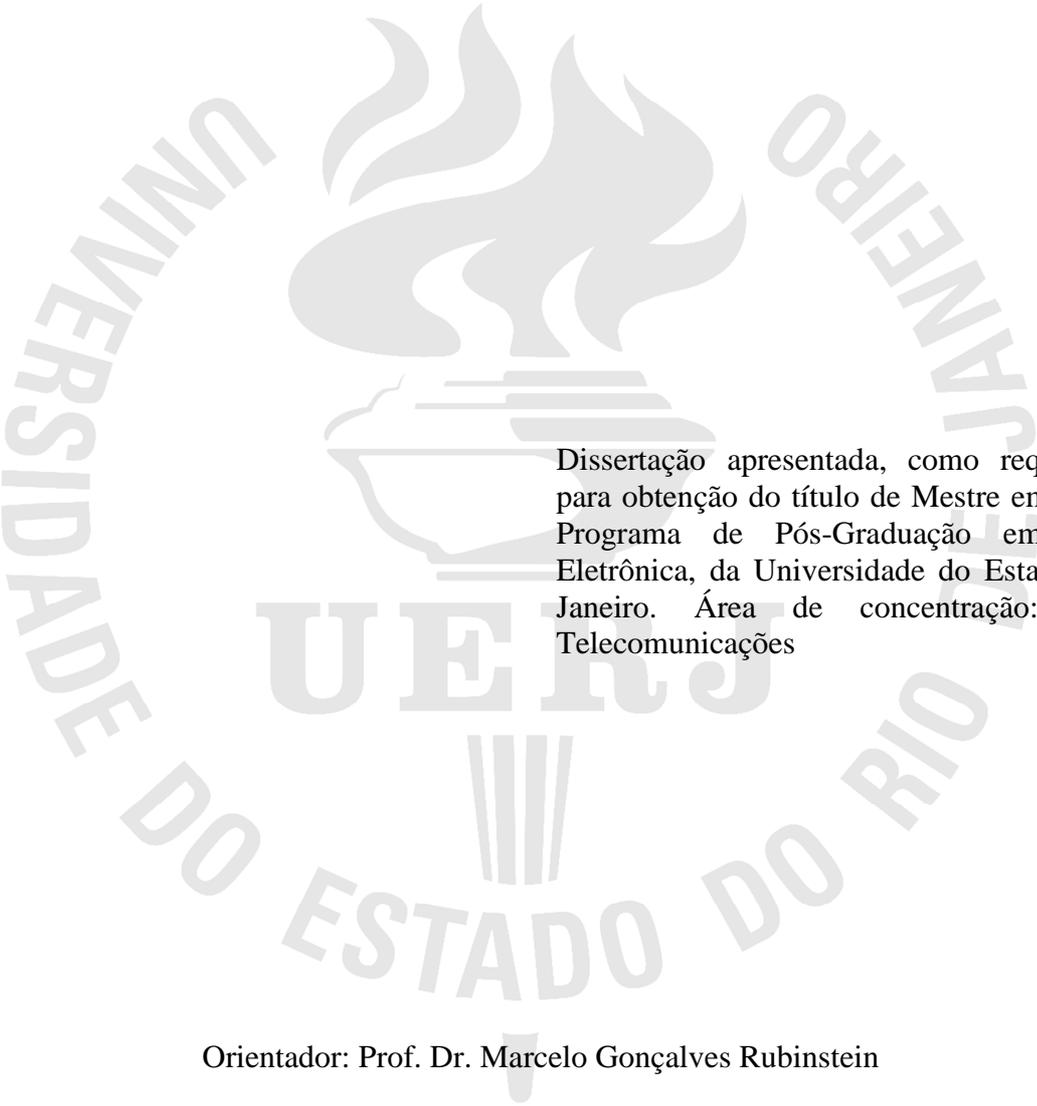
**Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE**

Rio de Janeiro

2014

Carlos Alberto Leite Bello Filho

**Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Rubinstein

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

Carlos Aberto Leite Bello Filho.  
Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE /  
Carlos Alberto Leite Bello Filho. – 2014.  
64f.

Orientador: Marcelo Gonçalves Rubinstein.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica. 2. TCP/IP (Administração de redes  
de computadores) - Dissertações. I. Rubinstein, Marcelo  
Gonçalves. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III.  
Título.

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Carlos Alberto Leite Bello Filho

**Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovado em: 26 de fevereiro de 2014.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Rubinstein (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Alexandre Sztajnberg

Instituto de Matemática e Estatística – UERJ

---

Prof. Dr. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Rio de Janeiro

2014

*Dedico esse trabalho primeiro a Deus, razão da minha existência, que adentra as minhas mãos para me fazer vencer as minhas guerras. À Gabriela e Felipe, maiores presentes de Deus na minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha querida esposa Flávia e aos meus filhos Gabriela e Felipe pela compreensão e ajuda nos diversos momentos em que precisei me ausentar das atividades familiares para dedicar mais tempo à pesquisa e estudo. Tem sido maravilhoso viver cada dia com vocês. Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da UERJ pela oportunidade que me deram de fazer parte de um maravilhoso ambiente de pesquisa; principalmente aos professores Marcelo e Alexandre, pela total disponibilidade e auxílio prestado ao longo de todo o curso. Agradeço ao meu orientador Marcelo G. Rubinstein, pela paciência e orientação. Por estar sempre presente, guiando o trabalho realizado com maestria. Enfim, a todos os que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui; muito obrigado!

*Deus é a minha fortaleza e a minha força, e ele perfeitamente desembaraça o meu caminho. Faz ele os meus pés como os das cervas, e me põe sobre as minhas alturas. Instrui as minhas mãos para a peleja, de maneira que um arco de cobre se quebra pelos meus braços.*

*2 Samuel 22:33-35*

## RESUMO

BELLO FILHO, Carlos Alberto Leite. **Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE**. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

O crescimento dos serviços de banda-larga em redes de comunicações móveis tem provocado uma demanda por dados cada vez mais rápidos e de qualidade. A tecnologia de redes móveis chamada LTE (*Long Term Evolution*) ou quarta geração (4G) surgiu com o objetivo de atender esta demanda por acesso sem fio a serviços, como acesso à Internet, jogos online, VoIP e vídeo conferência. O LTE faz parte das especificações do 3GPP *releases* 8 e 9, operando numa rede totalmente IP, provendo taxas de transmissão superiores a 100 Mbps (*DL*), 50 Mbps (*UL*), baixa latência (10 ms) e compatibilidade com as versões anteriores de redes móveis, 2G (GSM/EDGE) e 3G (UMTS/HSPA). O protocolo TCP desenvolvido para operar em redes cabeadas, apresenta baixo desempenho sobre canais sem fio, como redes móveis celulares, devido principalmente às características de desvanecimento seletivo, somreamento e às altas taxas de erros provenientes da interface aérea. Como todas as perdas são interpretadas como causadas por congestionamento, o desempenho do protocolo é ruim. O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho de vários tipos de protocolo TCP através de simulações, sob a influência de interferência nos canais entre o terminal móvel (UE – *User Equipment*) e um servidor remoto. Para isto utilizou-se o software NS3 (*Network Simulator* versão 3) e os protocolos TCP *Westwood Plus*, *New Reno*, *Reno* e *Tahoe*. Os resultados obtidos nos testes mostram que o protocolo TCP *Westwood Plus* possui um desempenho melhor que os outros. Os protocolos TCP *New Reno* e *Reno* tiveram desempenho muito semelhante devido ao modelo de interferência utilizada ter uma distribuição uniforme e, com isso, a possibilidade de perdas de bits consecutivos é baixa em uma mesma janela de transmissão. O TCP *Tahoe*, como era de se esperar, apresentou o pior desempenho dentre todos, pois o mesmo não possui o mecanismo de *fast recovery* e sua janela de congestionamento volta sempre para um segmento após o *timeout*. Observou-se ainda que o atraso tem grande importância no desempenho dos protocolos TCP, mas até do que a largura de banda dos links de acesso e de *backbone*, uma vez que, no cenário testado, o gargalo estava presente na interface aérea. As simulações com erros na interface aérea, introduzido com o script de *fading* (desvanecimento) do NS3, mostraram que o modo RLC AM (com reconhecimento) tem um desempenho melhor para aplicações de transferência de arquivos em ambientes ruidosos do que o modo RLC UM sem reconhecimento.

Palavras chave: LTE, TCP/IP, NS3, Análise de desempenho.

## ABSTRACT

BELLO FILHO, Carlos Alberto Leite. **Análise de desempenho do protocolo TCP em Redes LTE**. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

The growth of broadband services in mobile networks has led to a demand for data with faster and better quality transmissions. The mobile network technology called LTE (Long Term Evolution) or fourth generation (4G) came up with the objective of attending this demand for wireless access to services such as Internet access, online games, VoIP and video conferencing. LTE is part of the specifications of 3GPP Releases 8 and 9 operating in all-IP networks and providing transmission rates above 100 Mbps (DL), 50 Mbps (UL), low latency (10 ms) and compatibility with previous versions of mobile networks, 2G (GSM / EDGE) and 3G (UMTS / HSPA). The TCP protocol designed to operate in wired networks presents poor performance over wireless channels such as mobile cellular networks, due mainly to the characteristics of selective fading, shadowing and high error rates coming from the air interface. As all losses are interpreted as caused by congestion the protocol performance is bad. The objective of this dissertation is to evaluate the performance of several types of the TCP protocols through simulations, under the influence of channel interference between the mobile terminal (UE - User Equipment) and a remote server. For this, the NS3 (Network Simulator version 3) software and the protocols TCP Westwood Plus, New Reno, Reno and Tahoe were used. Results have shown that the TCP Westwood Plus protocol has a better performance than others. The New Reno and Reno TCP protocols had similar performance due to the proposed interference model, which has a uniform distribution and so the possibility of loss of consecutive bits is low on the same transmission window. TCP Tahoe, as expected has shown the worst performance among all because it does not have the fast recovery mechanism and its congestion window keeps coming back to one segment after a timeout. It was also observed that the delay has a greater importance in the performance of TCP when comparing with the bandwidth of the access and backbone links importance, once in the tested scenario the bottleneck was present in the air interface. The simulation performed with noise in the Air Interface, introduced by the NS3 fading script, showed that the RLC AM (acknowledged mode) had a better performance than the RLM UM (Unacknowledged mode).

Keywords: LTE, TCP/IP, NS3, Performance Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de assinantes de comunicações móveis no mundo [1].....	14
Figura 2 – Número de assinantes de comunicações móveis. [1].....	17
Figura 3 – Evolução das Redes de banda larga. ....	19
Figura 4 – Evolução das versões no 3GPP, modificada de [2].....	19
Figura 5 – Arquitetura de sistema para rede LTE .....	22
Figura 6 – Arquitetura (simplificada) de sistema para rede LTE .....	22
Figura 7 – Os protocolos da rede LTE .....	26
Figura 8 – Freescale Semicondutor – LTE White Paper (2008) .....	28
Figura 9 – Estrutura dos canais lógicos, de transporte e físicos no LTE [5].....	29
Figura 10 – Disposição das Portadoras na modulação FDM e OFDM. ....	32
Figura 11 – Comparação entre as modulações OFDM e OFDMA. ....	33
Figura 12 – Transmissão OFDMA x SC-FDMA .....	34
Figura 13 – Pilhas de protocolos do GRPS/EDGE.....	45
Figura 14 – Pilhas de protocolos do LTE. ....	45
Figura 15 – Topologia básica do módulo LTE do NS-3 .....	47
Figura 16 – Cenário básico utilizado nas simulações.....	48
Figura 17 – Cenários 1 e 2 de simulação.....	49
Figura 18 – Vazão x perdas de pacotes, MSS=536 bytes.....	51
Figura 19 – Vazão x perdas de pacotes, MSS=1500 bytes.....	52
Figura 20 – Vazão x Atraso no Backbone .....	53
Figura 21 – Vazão x Largura de banda no Backbone.....	54
Figura 22 – Janela de congestionamento dos vários flavours TCP .....	55
Figura 23 – Topologia Butterfly para simulação do índice de justiça.....	55
Figura 24 – Avaliação do índice de justiça – 2 usuários .....	56
Figura 25 – Avaliação do índice de justiça – 4 usuários .....	57
Figura 26 – Avaliação RLC AM versus RLC UM (d = 500m).....	59
Figura 27 – Avaliação RLC AM versus RLC UM (d = 2000m).....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categoria dos Terminais LTE definidos pelo 3GPP .....	25
Tabela 2 – Frequências no modo FDD definidas pelo 3GPP para o LTE.....	30
Tabela 3 - Frequências no modo TDD definidas pelo 3GPP para o LTE. ....	30
Tabela 4 - Resource Blocks e subportadoras [5]. ....	33
Tabela 5 - Vazão para largura de banda de 5 MHz. ....	35
Tabela 6 – Principais RFCs relacionadas ao TCP .....	36
Tabela 7 – Parâmetros de sistema para simulação .....	50
Tabela 8 – Parâmetros de simulação do sexto estudo. ....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS

2G	<i>2nd Generation of Mobile Network</i>
3G	<i>3rd Generation of Mobile Network</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>4th Generation of Mobile Network</i>
ACK	<i>ACKnowledgement</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
AWS	<i>Advanced Wireless Services</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
BS	<i>Base Station</i>
CA	<i>Carrier Aggregation</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CL-SM	<i>Closed Loop Spatial Multiplexing</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CSQ	<i>Closed Subscriber Group</i>
DSC	<i>Digital Cellular System</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DL	<i>DownLink</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for Global Evolution</i>
eNodeB (eNB)	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
EUA	<i>Estados Unidos da América</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FST	<i>Frame Structure Type</i>

GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMS	<i>Internet protocol Multimedia Subsystem</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ITU	<i>Internacional Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>Internacional Telecommunication Union – Radio communication Sector</i>
LB	<i>Largura de Banda</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
MME	<i>Mobility Managment Entity</i>
NACK	<i>Negative ACKnowledgement</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OL-SM	<i>Open Loop Spatial Multiplexing</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P-GW	<i>Packet data network GateWay</i>
P-SCH	<i>Primary-Synchronisation CHannel</i>
PAR	<i>Peak Average Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast CHannel</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator CHannel</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PCS	<i>Personal Communications Service</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>

PDCCH	<i>Physical Downlink Control CHannel</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDP	<i>Packet Data Protocol</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared CHannel</i>
PMI	<i>Precoding Matrix Indicators</i>
PRACH	<i>Physical Random Access CHannel</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
Objetivos e resultados.....	15
Estrutura da Dissertação .....	16
1. LTE.....	17
1.1. 3GPP – A Evolução das Redes Móveis Celulares.....	17
1.2. Motivações e Metas para o LTE.....	20
1.3. Arquitetura de Rede.....	21
1.4. Pilhas de Protocolos .....	25
1.5. Camada Física .....	29
2. O Protocolo TCP .....	36
2.1. Introdução.....	36
2.2. O Estabelecimento e o Término de Conexões.....	37
2.3. O Controle de Erros.....	37
2.4. O Controle de Fluxo .....	37
2.5. O Controle de Congestionamento.....	38
2.6. Tipos de TCP: Tahoe, Reno, New Reno e WestwoodPlus.....	39
2.7. Propostas para o TCP em Redes sem Fio.....	42
2.8. TCP em Redes Sem Fio ( IEEE 802.11 e Redes Celulares).....	43
3. SIMULAÇÕES.....	46
3.1. Software de Simulação .....	46
3.2. Objetivos.....	47
3.3. Cenários de Simulação .....	48
3.4. Parâmetros .....	49
3.5. Resultados.....	50
4. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS .....	63

## INTRODUÇÃO

O crescimento de assinantes de comunicações móveis aumentou absurdamente nos últimos anos no mundo, atingindo a marca de 6,6 bilhões de assinantes globais em setembro de 2013, conforme apresentado na Figura 1. A penetração mundial de comunicações móveis chegou a 90% de assinantes<sup>1</sup>.

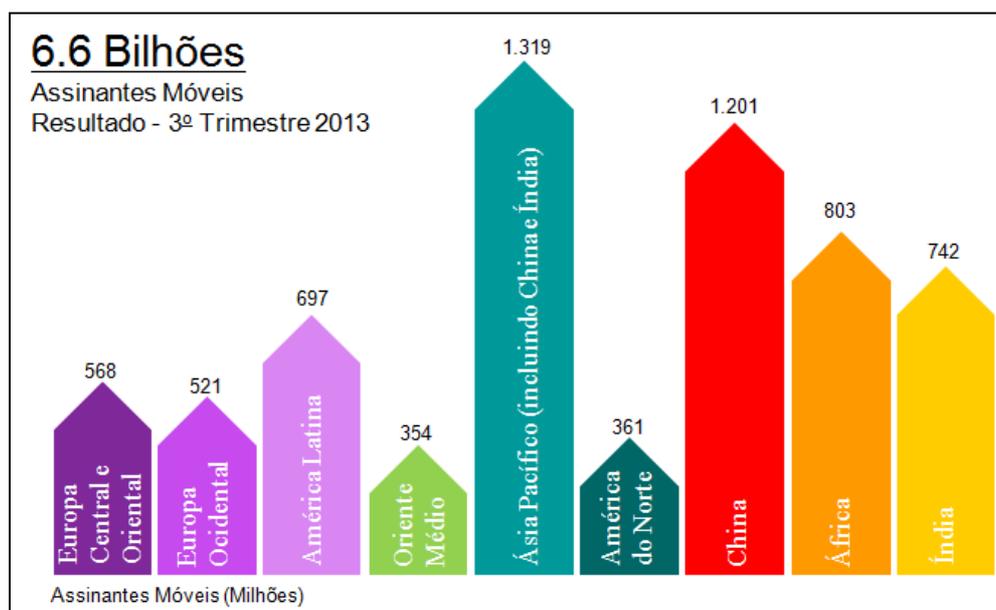


Figura 1 – Número de assinantes de comunicações móveis no mundo [1].

O crescimento dos serviços de banda-larga em redes de comunicações móveis tem provocado uma demanda por serviços cada vez mais rápidos e de qualidade. A demanda por serviços de dados é superior aos serviços de voz tradicional, e a expectativa é que aumente ainda mais devido à proliferação dos dispositivos móveis inteligentes, como os *smartphones* e *tablets*.

O LTE (*Long Term Evolution*), ou 4G, surgiu para atender esta demanda. O LTE faz parte das especificações do 3GPP *releases* 8 e 9, operando numa rede totalmente IP, provendo taxas de transmissão, medidas em pico, de 100 Mbps (*downlink*), 50 Mbps (*uplink*), baixa latência (10 ms) e compatibilidade com as versões anteriores de redes

<sup>1</sup> A penetração de assinantes pode variar uma vez que um usuário pode ter mais de uma assinatura e também existem assinaturas partilhadas por vários usuários.

móveis, 2G (GSM/EDGE) e 3G (UMTS/HSPA). No Brasil, a rede LTE opera atualmente na banda 7 (2600 MHz) nos modos FDD (*Frequency Division Duplexing*) com as operadoras Oi, TIM, Claro e Vivo, e TDD (*Time Division Duplexing*) com a SKY e a *Sunrise*.

As redes móveis oferecem o grande benefício de mobilidade, permitindo flexibilidade e acesso de banda larga em grandes áreas geográficas. Ao mesmo tempo, isto pode se tornar um problema devido às grandes variações de sinais dos canais sem fio, principalmente pelas características de desvanecimento seletivo, sombreamento e pelas altas taxas de erros provenientes da interface aérea. Este aspecto causa problemas no desempenho do protocolo TCP, desenvolvido originalmente para operar em redes cabeadas, e utilizado amplamente pelos serviços de aplicação oferecidos pela Internet, tais como: HTTP, SMTP, FTP, TELNET. O protocolo TCP, por ser um protocolo fim a fim, não recebe nenhuma notificação explícita da rede caso haja um congestionamento, e utiliza a perda de pacotes para tomada de decisão de aumentar ou diminuir a janela de congestionamento. No caso de redes sem fio, o TCP pode reduzir a janela de congestionamento desnecessariamente, diminuindo as taxas de transmissão dos usuários. Por este motivo, faz-se necessário o estudo do TCP em redes móveis como o LTE.

## **Objetivos e resultados**

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do protocolo TCP sobre uma rede LTE num ambiente fim-a-fim através de simulações. Ambos são complexos e a interação entre eles pode gerar resultados inesperados, sendo necessário o estudo e a interpretação dos mesmos.

Inicialmente foram propostos quatro cenários para avaliação de desempenho, variando-se a taxa de erros no canal físico de transmissão, atraso e largura de banda do *backbone*, todos no sentido *downlink*. De forma a observar melhor o comportamento do protocolo TCP sem influência das camadas de protocolos do LTE foram desabilitados os controles de erros da camada física, os algoritmos de retransmissão de pacotes HARQ da subcamada MAC e o ARQ da subcamada RLC. Foram avaliados os protocolos TCP *Westwood Plus*, *New Reno*, *Reno* e *Tahoe*. Os resultados obtidos nos testes mostram que o protocolo TCP *Westwood Plus* possui um desempenho melhor que

os outros. Os protocolos TCP *New Reno* e *Reno* tiveram desempenho muito semelhante devido ao modelo de interferência utilizado ter uma distribuição uniforme e, com isso, a possibilidade de perdas de bits consecutivos é baixa em uma mesma janela de transmissão. O TCP *Tahoe*, como era de se esperar, apresentou o pior desempenho dentre todos, pois o mesmo não possui o mecanismo de *fast recovery* e sua janela de congestionamento volta sempre para um segmento após o *timeout*. Observou-se ainda que o atraso tem grande importância no desempenho dos protocolos TCP, mais até do que a largura de banda dos links de acesso e de *backbone*. Os valores de MSS influíram diretamente na vazão obtida. O índice de justiça calculado mostrou que os protocolos TCPs são justos, sem nenhuma grande diferença entre os tipos estudados. Em uma segunda etapa, foi utilizado um novo cenário de simulação. Os resultados obtidos com a introdução do ruído na interface aérea, habilitando o controle de erros na camada MAC, mostraram um melhor desempenho do RLC AM a partir de uma distância de 2000 m, significando que o mesmo é mais apropriado para aplicações de transferência de arquivos como o FTP em ambientes com ruído intenso.

### **Estrutura da Dissertação**

A dissertação está organizada da seguinte forma. No Capítulo 1, são abordados os conceitos e as principais características da tecnologia de rede LTE, tais como arquitetura de rede, arquitetura de protocolos e interface aérea. No Capítulo 2, é feita uma breve descrição do protocolo TCP, suas características de controle de erros, controle de fluxo e controle de congestionamento. O comportamento do TCP sobre redes sem fio é abordado, juntamente com os mecanismos para melhorar o desempenho do TCP neste tipo de redes, incluindo as redes móveis 2G, 3G e 4G. O Capítulo 3 apresenta os cenários de simulação utilizados neste trabalho. São descritos a topologia, os parâmetros e as métricas coletadas. Os resultados são apresentados e discutidos em detalhes. Finalmente no Capítulo 4 apresentamos as conclusões, e em seguida as sugestões para trabalhos futuros.

## 1. LTE

### 1.1. 3GPP – A Evolução das Redes Móveis Celulares

O crescimento dos serviços de banda-larga em redes de comunicações móveis tem provocado uma demanda por serviços cada vez mais rápidos e de qualidade. A demanda por serviços de dados é superior aos serviços de voz tradicional, e a expectativa é aumentar ainda mais devido a proliferação dos dispositivos móveis inteligentes, como os *smartphones e tablets*. Podemos ver na Figura 2 o crescimento global pelos serviços de dados frente aos serviços de voz tradicional.

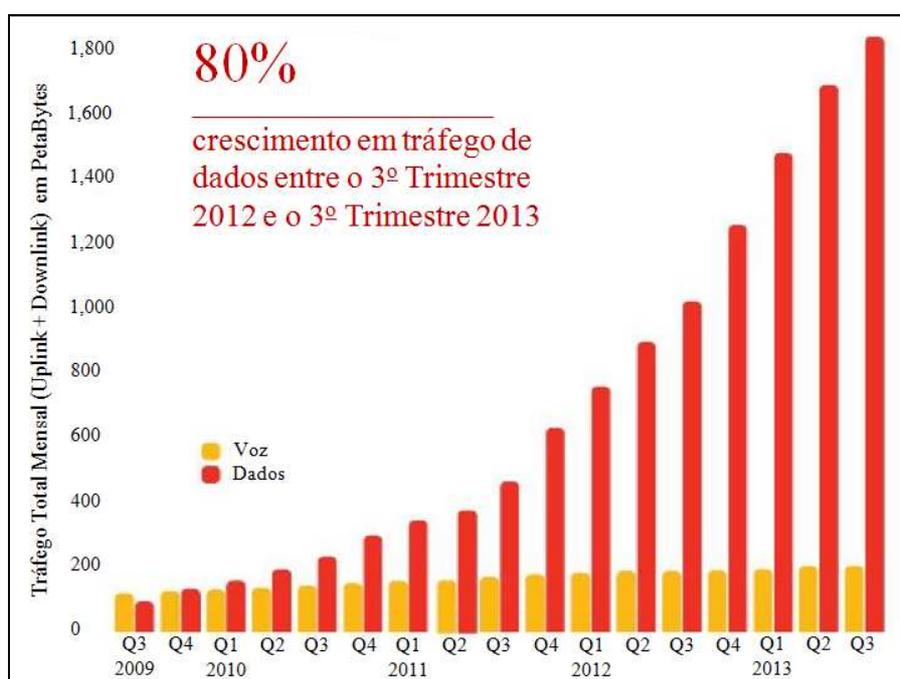


Figura 2 – Número de assinantes de comunicações móveis [1].

O 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) é uma associação criada em 1998 que reúne uma série de órgãos normativos de telecomunicações, e que nasceu com o objetivo de padronizar a evolução dos sistemas de telecomunicações móveis 3G, originados do GSM (*Global System for Mobile*). O 3GPP reúne seis principais organizações normativas de telecomunicações (ARIB - *Association of Radio Industries and Businesses*, Japão, ATIS - *Alliance for Telecommunications Industry Solutions*, CCSA, EUA - *China Communications Standards Association*, ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*, Europa, TTA - *Telecommunications*

*Technology Association*, Korea e TTC - *Telecommunication Technology Committee*, Japão), denominados “Parceiros Organizacionais”. Atualmente tem mais de 400 membros dentre empresas e instituições. O 3GPP define especificações das chamadas tecnologias 3GPP (GSM, WCDMA e LTE). O 3GPP possui quatro grupos de especificações técnicas, os chamados TSG (*Technical Specification Group*): redes de acesso de rádio (RAN – *Radio Access Network*), redes principais e terminais (CT- *Core networks & Terminals*), rede de serviços e aspectos do sistema (SA – *Service & System Aspects*) e GSM EDGE *Radio Access Networks* (GERAN) [2].

As especificações do 3GPP estão estruturadas em versões ou *releases*. Normalmente, as discussões de tecnologias do 3GPP referem-se às funcionalidades em uma ou outra versão. O principal foco do 3GPP é manter a compatibilidade com as versões anteriores, assim terminais LTE são compatíveis com as tecnologias WCDMA (3G) e GSM (2G).

A segunda geração de redes móveis (2G), ou GSM, foi originalmente desenvolvida para o tráfego de voz, enquanto a capacidade para dados foi adicionada mais tarde através do GPRS e melhorada pelo seu sucessor, o EDGE. A utilização de dados aumentou, mas o 2G é dominado pela voz.

A terceira geração de redes móveis (3G), ou UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), se consolidou realmente como um serviço de banda larga móvel, podendo atingir taxas de 14,4 Mbps (DL) e 5,76 Mbps (UL) com HSPA (HSDPA/HSUPA), ou 42 Mbps (DL) e 11,5 Mbps (UL) com o 3GPP *Release 8 HSPA Plus*.

Com a demanda crescente de dados e com a demanda por taxas cada vez mais altas, o 3GPP definiu a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) ou quarta geração (4G).

O LTE faz parte das especificações do 3GPP *releases 8 e 9*, opera numa rede totalmente IP, utilizando-se das tecnologias MIMO (*Multiple Input and Multiple Output*) e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), e consegue prover taxas superiores a 100 Mbps (DL), 50 Mbps (UL) - dependendo da categoria do terminal, baixa latência e compatibilidade com as versões anteriores de redes móveis, 2G (GSM/EDGE) e 3G (UMTS/HSPA). É importante salientar que o LTE oferece serviços de dados móveis numa rede totalmente IP. A voz é tratada via VoIP (VoLTE – *Voice over LTE*) ou através da funcionalidade de CSFB (*Circuit Switch FallBack*), onde

o usuário é direcionado para as tecnologias 2G ou 3G, realiza o chamado *Inter System Handover*, e faz as chamadas de voz. Na Figura 3 podemos ver a evolução das tecnologias de banda larga sem fio e a Figura 4 mostra a evolução dos *releases* do 3GPP.

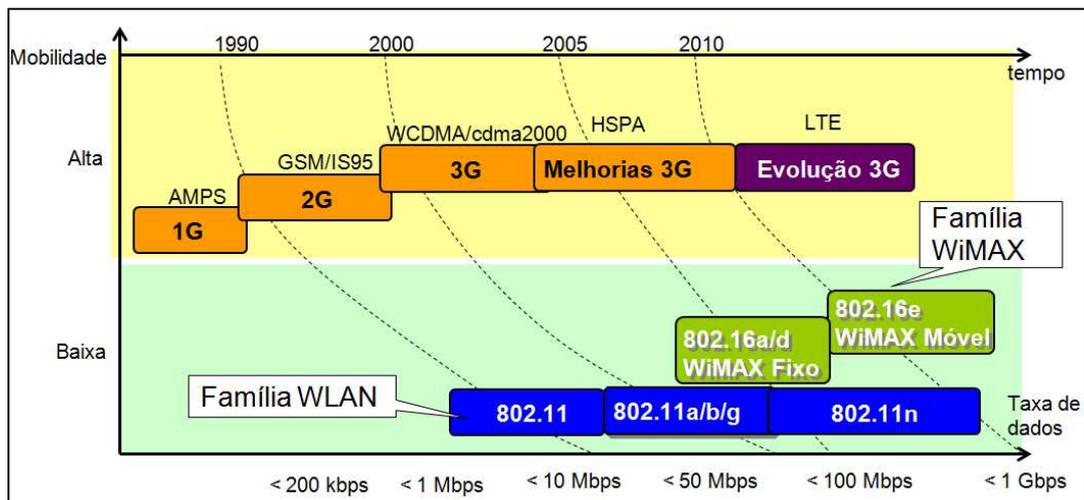


Figura 3 – Evolução das Redes de banda larga.  
Fonte: Modificada de Nokia Siemens Networks

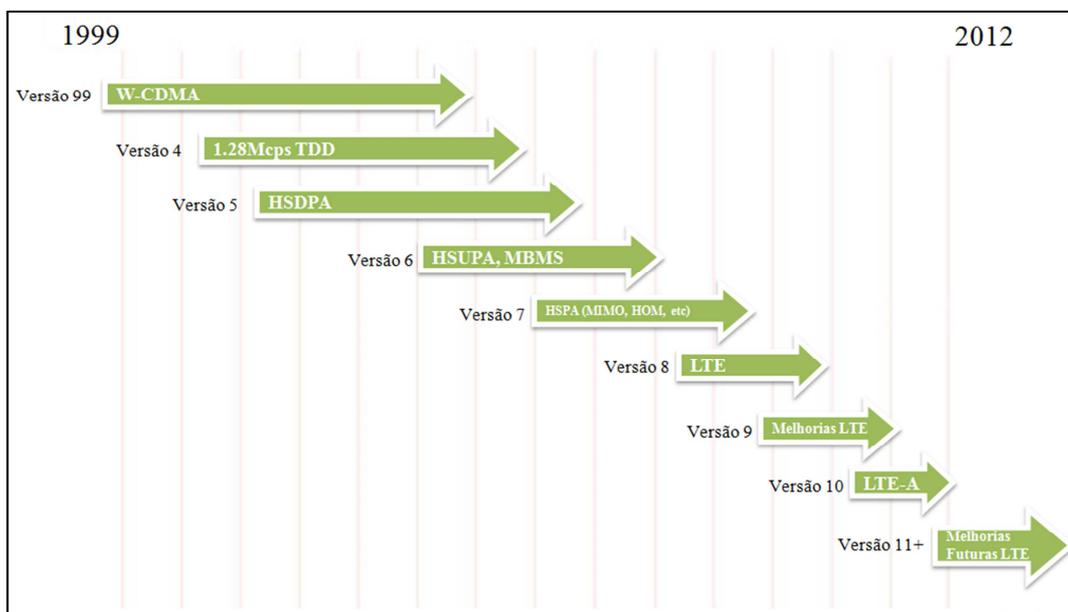


Figura 4 – Evolução das versões no 3GPP, modificada de [2].

## 1.2. Motivações e Metas para o LTE

O início dos trabalhos do 3GPP para definição do LTE (*release* 8) começou em 2004 com a definição das metas. Neste período, o HSDPA ainda não estava comercial, mas havia um consenso da necessidade de se iniciarem os trabalhos para definição da próxima tecnologia de acesso via rádio. Entre a padronização, o desenvolvimento dos equipamentos e os testes de interoperabilidade dos sistemas, passaram-se mais de cinco anos até a implementação comercial do LTE; o que justifica a necessidade de se começar cada vez mais cedo os trabalhos de padronização dos *releases*. Podemos citar alguns fatores que justificam a necessidade do LTE: a evolução da capacidade de transmissão de dados da rede fixa (como ADSL+ e *Cable Modem*), a necessidade de capacidade de transmissão de dados da rede móvel, a necessidade de baixo custo de dados móveis, a necessidade de baixo custo de equipamentos por volume de dados (aumento de capacidade dos equipamentos de rede móvel), e a concorrência de outras tecnologias sem fio como IEEE 802.16 ou 802.11n. As tecnologias do 3GPP têm o objetivo de se igualar ou superar a concorrência [3].

A tecnologia LTE foi projetada para ser capaz de proporcionar um desempenho superior em comparação com as redes 3GPP baseadas na tecnologia HSPA. As metas de desempenho do LTE foram definidas pelo 3GPP em relação à tecnologia HSPA (*release* 6). A velocidade de transmissão de pico do usuário foi estabelecido como no mínimo 100 Mbps no sentido *Downlink* (DL) e 50 Mbps no sentido *Uplink* (UL), o que representa 10 vezes mais do que o HSPA *release* 6; isto foi conseguido com a utilização das tecnologias OFDMA e MIMO. A latência também foi reduzida de forma a melhorar o desempenho do usuário. Isto foi conseguido com a introdução do conceito de *direct tunnel*, onde o plano do usuário é conectado diretamente ao gateway de borda, diminuindo o número de saltos e conseqüentemente o atraso. O consumo de energia do terminal também foi minimizado, de forma a permitir uma maior autonomia sem a necessidade de recarregar a bateria. Isto foi conseguido com funcionalidades inteligentes de economizar bateria nos momentos em modo de espera, e tipo de modulação no *uplink* (SC-FDMA) com menor consumo de energia. As principais metas de desempenho definidas para o sistema LTE estão listadas a seguir [4]:

- eficiência espectral 2 ou 4 vezes superior à do HSPA *release* 6;
- velocidade de pico superior a 100 Mbps no DL e 50 Mbps no UL;
- tempo de resposta inferior a 10 ms no plano do usuário;

- latência no plano de controle menor que 5 ms;
- alto nível de mobilidade e segurança;
- otimização da eficiência energética do terminal;
- flexibilidade de larguras de banda - 1,4 até 20 MHz.

### 1.3. Arquitetura de Rede

Há uma tendência mundial em migrar as redes de telefonia móvel e fixa para uma rede totalmente IP, com comutação de pacotes (PS – *Packet Switching*), abandonando as redes baseadas em comutação de circuitos (CS – *Circuit Switching*), devido a sua baixa eficiência e custos elevados.

As redes móveis 2G e 3G foram inicialmente projetadas para uma rede baseada em CS, mas aos poucos vêm migrando tanto no *core* quanto no acesso para uma rede IP. O *core* iniciou esta escalada com a introdução do 3GPP *release 4*, desmembrando a MSS nos elementos MGW (*Media GateWay*) e MSS (*MSC Server*), conectados entre si via IP, aumentando a capacidade de sinalização e a comutação de chamadas VoIP entre centrais MGW. A rede de acesso vem aos poucos migrando para IP com investimento em redes Metro Ethernet nas áreas metropolitanas, e com rádios micro-ondas de alta capacidade nas áreas mais afastadas.

Conforme descrito no capítulo introdutório, as demandas de dados móveis cresceram absurdamente nos últimos dez anos e a busca por aumento de banda de transmissão fez com que o 3GPP decidisse que o LTE seria baseado numa rede totalmente IP, mais eficiente e com custo reduzindo em relação às tecnologias como ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) ou PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*). A arquitetura de sistema para rede LTE está representada nas Figuras 5 e 6. O sistema EPS (*Evolved Packet System*) compõe todo o sistema LTE. O subsistema EPC (*Evolved Packet Core*) compõe as funcionalidades de controle de mobilidade, acesso a serviços e à *Internet*, e as interfaces de comunicação entre a rede de acesso e o sistema de serviços. O subsistema E-UTRAN (*Evolved - UTRAN*) compõe as estações rádio base, chamadas de eNodeB (*Enhanced NodeB*), as interfaces aéreas (LTE U-u), as interfaces S1 de conexão com o EPC, e as interfaces X2 de conexão entre as eNodeBs.

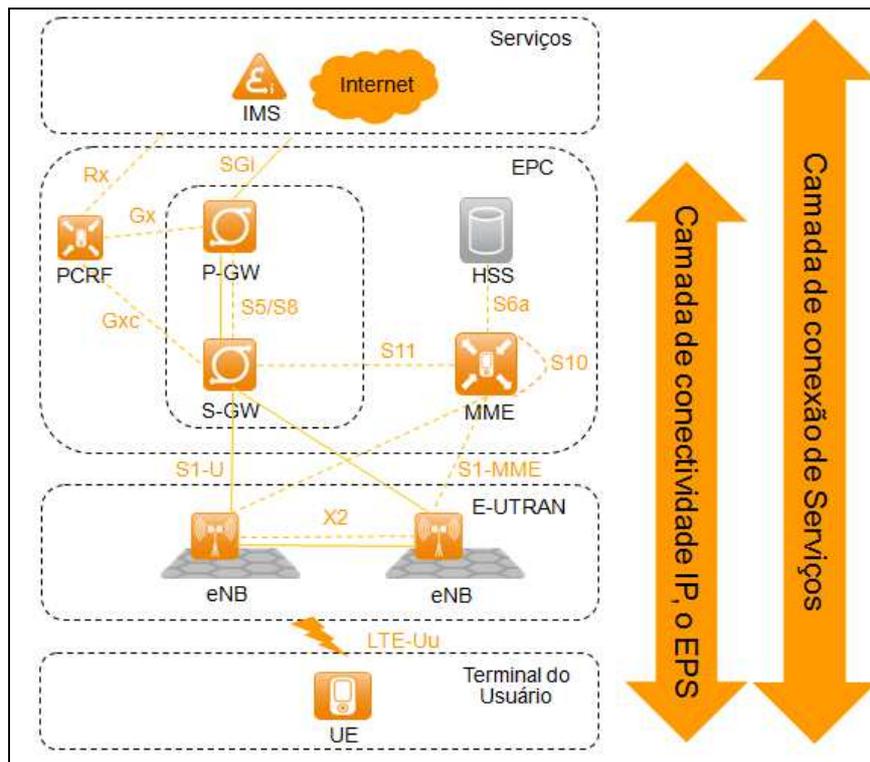


Figura 5 – Arquitetura de sistema para rede LTE.  
Fonte: Adaptada de A. Toskala

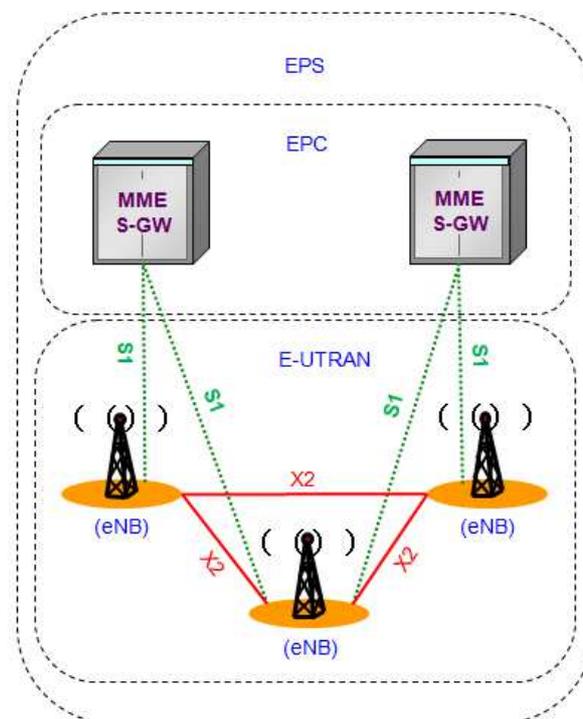


Figura 6 – Arquitetura (simplificada) de sistema para rede LTE.  
Fonte: Adaptada de A. Toskala

### 1.3.1. eNodeB (*Enhanced Base Stations*)

A estação rádio base é chamada no LTE de eNodeB ou eNB (*enhanced NodeB*) para diferenciar da nomenclatura NodeB adotada na tecnologia UMTS. A eNodeB passa a realizar funções de processamento e controle antes realizadas pela RNC (*Radio Network Control*) no UMTS.

Os fabricantes tiveram que investir muito na tecnologia das eNodeBs, de forma a atender as especificações do LTE. Hoje vemos equipamentos compactos, com alto poder de processamento, grande eficiência energética, e possibilidade de evolução dos *releases* futuros do 3GPP apenas com a adição/substituição de software, sem a necessidade de troca completa do hardware implantado. Isto significa uma redução nos custos por instalação de equipamentos, viabilizando a ampliação de mais eNodeBs e conseqüentemente o aumento de cobertura da rede LTE.

### 1.3.2. EPC (*Evolved Packet Core*)

O subsistema EPC (*Evolved Packet Core*) é composto pelas seguintes entidades: S-GW (*Serving Gateway*), PDN-GW ou P-GW (*Packet Data Network – GateWay*), MME (*Mobility Management Entity*), HSS (*Home Subscriber Server*), e o PCRF (*Policy and Charge Rules Function*).

O S-GW e o MME têm funções semelhantes às executadas pelo SGSN (*Serving GPRS Support Node*) do UMTS/GSM. Na prática, alguns fabricantes implementam o S-GW e o MME no mesmo hardware físico. Quando separados, a interface S11 será a responsável pela comunicação entre eles. Juntos, a interface S11 pode ser um barramento de um servidor.

O MME é responsável pela mobilidade do usuário e pelas funções de autenticação, segurança, estabelecimento de conexões, autorização de serviços, suporte ao *handover* entre eNodeBs ou *handover* entre sistemas (LTE e 3G ou LTE e 2G).

O MME também é responsável pela seleção do P-GW quando o móvel requer endereços IP da rede. Para isto, o MME contém uma tabela com uma lista de P-GWs associados por APN (*Access Point Name*). O nome do ponto de acesso (APN) é cadastrado no terminal do usuário. Assim, o usuário envia o pedido de conexão juntamente com a APN do serviço solicitado, o MME recebe o pedido de conexão, consulta a tabela de APN e encaminha para o P-GW correspondente.

O *Serving Gateway* é responsável pelo roteamento de pacotes IP entre a rede LTE e outras tecnologias como 2G ou 3G, armazena informações temporárias dos usuários como serviços IP suportados (informações recebidas do HSS e PCRF) e informações de roteamento interno da rede LTE.

O P-GW (*Packet-data network GateWay*) é o roteador de borda do LTE, tem atribuições semelhantes as do GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) no sistema UMTS/GSM. Basicamente, O P-GW aloca endereços IP para os usuários se comunicarem com os serviços externos, como no acesso à Internet.

O HSS (*Home Subscriber Server*) agrega as funções do HLR (*Home Location Register*), AuC (*Authentication Center*) e EIR (*Equipment Identity Register*), todos equipamentos do UMTS/GSM, onde mantém um banco de dados com os registros e perfis de serviços dos usuários. A comunicação entre o HSS e a MME é realizada pela interface S6.

O PCRF (*Policy and Charging Function*) é responsável pela política e controle de carga na rede LTE. Provê a QoS adequada aos serviços de rede solicitados. Pode, por exemplo, diminuir a vazão do usuário caso o volume de dados acordado tenha sido ultrapassado.

### **1.3.3. Terminal do Usuário (UE – *User Equipment*)**

As características técnicas do terminal do usuário têm papel fundamental no desempenho do sistema, em termos de taxa de transmissão de DL e UL.

A norma 3GPP-TS 36.101 (*User Equipment (UE) radio transmission and reception*) descreve as funcionalidades para cada categoria de serviços.

Podemos resumir as categorias dos terminais do usuário em termos de capacidade de taxas de transmissão de DL e UL, medidas em pico e número de bits do TB (*Transport Block*) do canal DL-SCH mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Categoria dos Terminais LTE definidos pelo 3GPP.

Categoria do usuário	Taxa de Transmissão DL/UL	Largura de banda	Modulação DL	Número de DL-SCH TB bits	Modulação UL	Configuração MIMO DL
Classe 1	10/5 Mbps	20MHz	64 QAM	10.296	16 QAM	1x2
Classe 2	50/25 Mbps	20 MHz	64 QAM	51.024	16 QAM	2x2
Classe 3	100/50 Mbps	20 MHz	64 QAM	102.048	16 QAM	2x2
Classe 4	150/50 Mbps	20 MHz	64 QAM	150.752	16 QAM	2x2
Classe 5	300/75 Mbps	20 MHz	64 QAM	302.752	64 QAM	4x4

### 1.3.4. Serviços

A categoria de serviços está relacionada com todo tipo de serviço ou conteúdo disponibilizado pelas operadoras de celular. Dentre os serviços, podemos citar o acesso à Internet, os jogos online, *VoIP*, o acesso a aplicativos WAP, etc.

Estes serviços são encaminhados pelo PGW às entidades responsáveis, por exemplo: jogos online são direcionados para a IMS (*Internet Multimedia System*) e o acesso aos aplicativos WAP vão para o servidor *Wap Gateway*.

Todo o conteúdo, velocidade de banda e serviços contratados são controlados pelo equipamento PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) de forma online.

## 1.4. Pilhas de Protocolos

Nesta seção serão apresentadas as funções dos diferentes protocolos e sua localizações na arquitetura do LTE. A Figura 7 mostra a disposição dos protocolos na rede LTE.

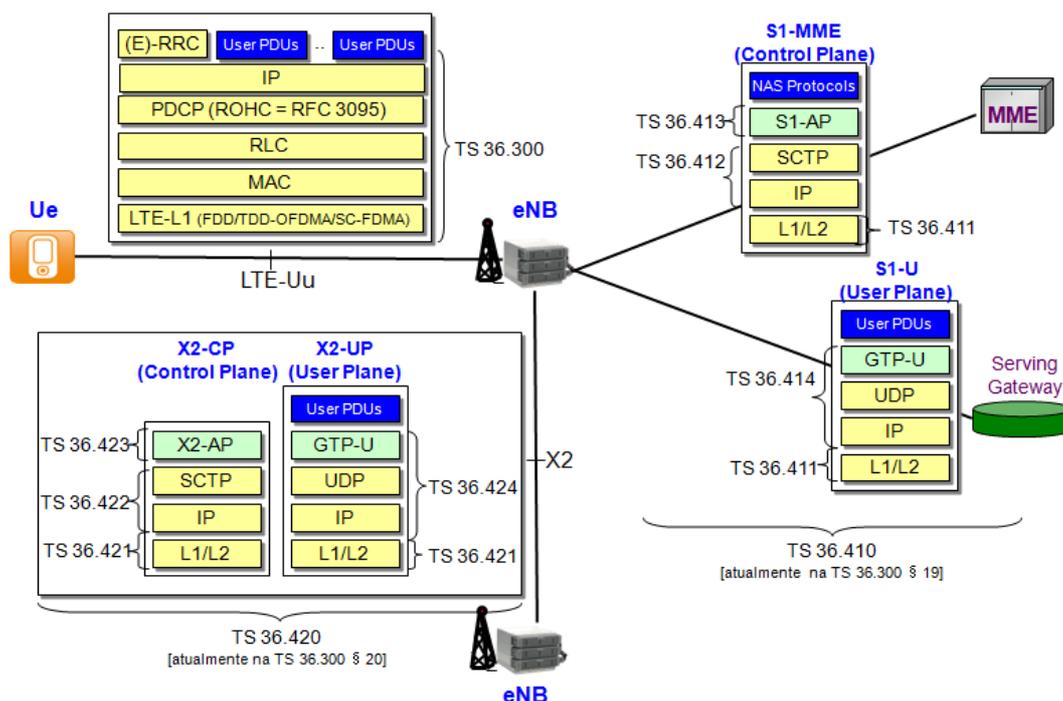


Figura 7 – Os protocolos da rede LTE.  
 Fonte: Modificada de Nokia Siemens Networks

O 3GPP teve como premissas iniciais no desenvolvimento dos protocolos da interface rádio da rede E-UTRAN os seguintes pontos:

- Simplificar a arquitetura de protocolos;
- Não usar canais dedicados, com objetivo de se obter uma camada MAC (*Medium Access Control*) simplificada;
- Evitar a existência de funções similares entre os elementos de Acesso e os elementos de *Core*.

O projeto do LTE é completamente baseado em canais compartilhados e de *broadcast*, não havendo mais nenhum canal dedicado para trafegar dados a usuários específicos. Esta escolha aumenta a eficiência da interface aérea, fazendo com que a rede seja capaz de controlar a utilização dos recursos da interface ar, de acordo com a demanda de cada usuário em tempo real, não existindo mais a necessidade de alocação de recursos fixos para cada usuário, independente dos requerimentos necessários [5], [6].

O protocolo NAS (*Non Access Stratum*) é utilizado para fins de controle entre o UE e o MME e opera de modo transparente no subsistema E-UTRAN. As mensagens são cifradas e suas integridades são garantidas pelo MME e pelo UE.

A subcamada RRC (*Radio Resource Control*) estabelece funções de controle de acesso no subsistema E-UTRAN. Provê mensagens para gerenciamento do sistema, controla medições e relatório de medições, toma decisões de *handover*, etc.

A camada PDCP (*Packet Data Control Protocol*) é responsável pela compressão e descompressão dos cabeçalhos IP através do ROHC (*RObust Header Compression - RFC 3095*) [7], e realiza também a criptografia dos dados no plano do usuário e no plano de controle.

A camada RLC executa as funções de segmentação/concatenação/remontagem das SDUs (*Service Data Units*) RLC, reordenação das SDUs, entrega em sequência, e correção de erros através do mecanismo ARQ. A camada RLC pode operar em um dos três modos de confiabilidade: o modo com reconhecimento (AM – *Acknowledged Mode*), modo sem reconhecimento (UM – *Unacknowledged Mode*) ou modo transparente (TM – *Transparent Mode*). O Modo UM suporta segmentação/remontagem, entrega em sequência, não suporta retransmissões, e é adequado para serviços em tempo real como VoIP. O modo AM por outro lado suporta retransmissões, e é adequado para serviços que não são transmitidos em tempo real como arquivos para download. O modo TM é completamente transparente, ele não suporta retransmissões, segmentação/remontagem, nem entrega em sequência. O modo TM é usado quando o tamanho dos quadros é previamente conhecido, como nas mensagens de broadcast (BCCH, CCCH e PCCH).

Existem dois níveis de retransmissões para fornecer confiabilidade, *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ) na camada MAC e ARQ externa na camada RLC, que funciona como um complemento para tratar os erros residuais que não são corrigidos pelo HARQ.

O mecanismo HARQ é realizado em combinação com a camada MAC e física, retransmite os blocos de transporte (TBs – *Transport Blocks*) para recuperação de erros. O HARQ na camada física executa a buferização e a recombinação (redundância incremental), e na camada MAC o gerenciamento e a sinalização. A camada MAC envia um NACK quando detecta uma falha no CRC do bloco de transporte,

normalmente a camada física indica esta falha. A retransmissão é feita na eNodeB ou no UE no *downlink* usando códigos diferentes. O código é enviado e mantido no buffer da eNodeB. Eventualmente, após uma ou duas tentativas, haverá dados suficiente para reconstruir o sinal original. Na operação do HARQ, não há necessidade das retransmissões chegarem totalmente corretas, já que blocos retransmitidos têm códigos diferentes e são combinados matematicamente recuperando o bloco original.

O mecanismo HARQ é suportado somente pelos canais DL\_SCH e UL\_SCH. Oito processos do tipo “*stop-and-wait*” são empregados pelo HARQ para garantir uma retransmissão assíncrona no *downlink* e uma retransmissão síncrona no *uplink*. Retransmissões síncronas significam que os blocos HARQ ocorrem em um intervalo de tempo periódico pré-definido, desta forma nenhuma sinalização é necessária para indicar ao receptor a retransmissão dos dados. Já o HARQ assíncrono oferece a possibilidade de programar a retransmissão dos dados baseada nas condições da interface aérea. A Figura 8 mostra a estrutura de canais da camada de enlace para *uplink* e *downlink* respectivamente. As camadas PDCP, RLC e MAC constituem a camada enlace.

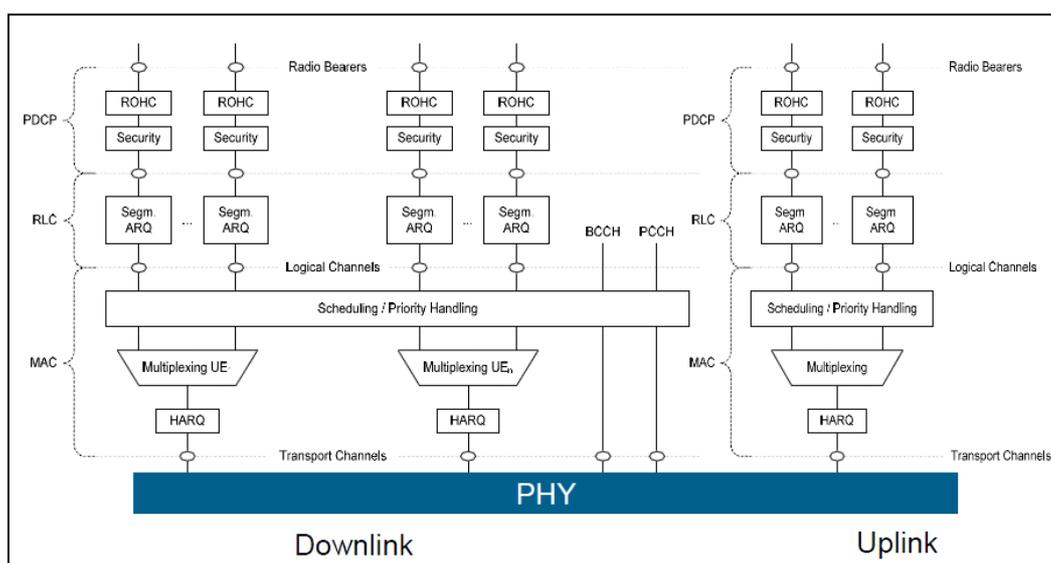


Figura 8 – Freescale Semiconductor – LTE White Paper (2008).

A interface aérea e as conexões da camada física são controladas e gerenciadas pela camada 2, através do RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Medium Access Control*). Os canais da interface rádio no LTE podem ser separados em dois tipos, canais físicos e sinais físicos. Os canais físicos correspondem a um conjunto de elementos que carregam

informações originadas pelas altas camadas (NAS). Os sinais físicos correspondem a um conjunto de elementos utilizados unicamente pela camada física, que não carregam informações originadas pelas altas camadas. A Figura 9 ilustra o mapeamento dos canais lógicos, de transporte e físicos no LTE [5].

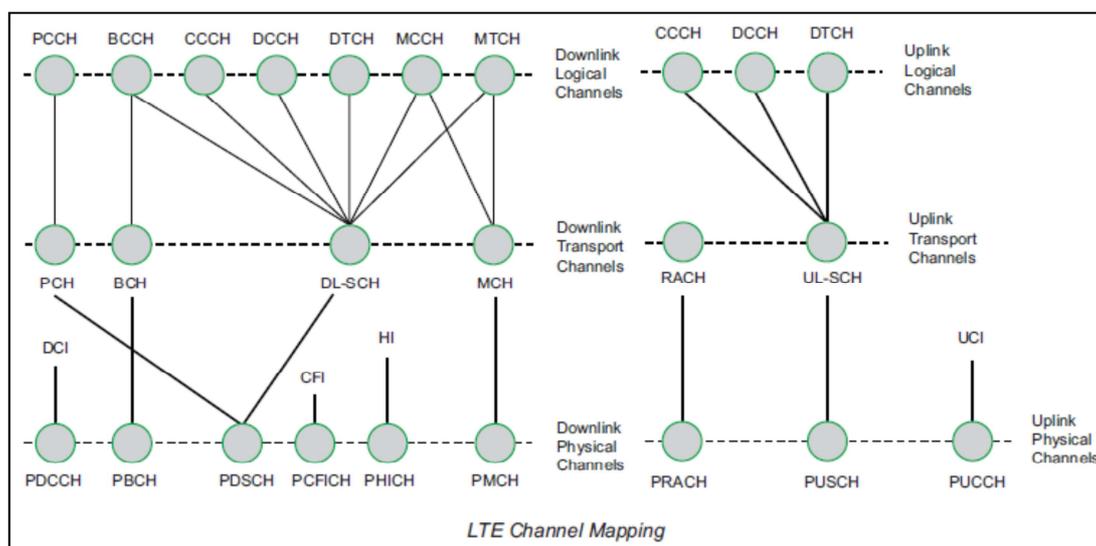


Figura 9 – Estrutura dos canais lógicos, de transporte e físicos no LTE [5].

## 1.5. Camada Física

A camada física do LTE compõe informações da faixa de frequência, tipo de multiplexação (TDD ou FDD) e tipo de modulação (OFDMA ou SC-FDMA) utilizada.

Os detalhes das especificações da camada física encontram-se na especificação 3GPP TS 36.201 *Physical layer, General description*.

### 1.5.1. Faixas de Frequências

As faixas de frequências definidas para o LTE estão divididas em dois grupos, de acordo com os modos de operação: FDD (*Frequency Division Duplexing*) e TDD (*Time Division Duplexing*).

Nas Tabelas 2 e 3 podem ser verificadas as frequências de operação do LTE nos modos de operação FDD e TDD, definidas pelo 3GPP.

Tabela 2 – Frequências no modo FDD definidas pelo 3GPP para o LTE.

Banda de operação	Uplink (UL)	Downlink (DL)	Multiplexação	Canal (MHz)	Frequência (MHz)
1	1,920 – 1,980	2,110 – 2,170	FDD	5, 10, 15, 20	2,1
2	1,850 – 1,910	1,930 – 1,990	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1,9
3	1,710 – 1,785	1,805 – 1,880	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1,8
4	1,710 – 1,755	2,110 – 2,155	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1,7
5	824 – 849	869 – 894	FDD	1.4, 3, 5, 10	850
6	830 – 840	875 – 885	FDD	5, 10	850
7	2,500 – 2,570	2,620 – 2,690	FDD	5, 10, 15, 20	2,6
8	880 – 915	925 – 960	FDD	1.4, 3, 5, 10	900
9	1,749.9 – 1,784.9	1,844.9 – 1,879.9	FDD	5, 10, 15, 20	1,8
10	1,710 – 1,770	2,110 – 2,170	FDD	5, 10, 15, 20	1,7
11	1,427.9 – 1,447.9	1,475.9 – 1,495.9	FDD	5, 10	1,5
12	699 – 716	729 – 746	FDD	1.4, 3, 5, 10	700
13	777 – 787	746 – 756	FDD	5, 10	700
14	788 – 798	758 – 768	FDD	5, 10	700
17	704 – 716	734 – 746	FDD	5, 10	700
18	815 – 830	860 – 875	FDD	5, 10, 15	850
19	830 – 845	875 – 890	FDD	5, 10, 15	850
20	832 – 862	791 – 821	FDD	5, 10, 15, 20	800
21	1,447.9 – 1,462.9	1,495.9 – 1,510.9	FDD	5, 10, 15	1,5
22	3,410 – 3,490	3,510 – 3,590	FDD	5, 10, 15, 20	3,5
23	2,000 – 2,020	2,180 – 2,200	FDD	1.4, 3, 5, 10	2
24	1,626.5 – 1,660.5	1,525 – 1,559	FDD	5, 10	1,6
25	1,850 – 1,915	1,930 – 1,995	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1,9
26	814 – 849	859 – 894	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15	850
27	807 – 824	852 – 869	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15	850
28	703 – 748	758 – 803	FDD	5, 10, 15, 20	700
29	n/a	716 – 728	FDD	5, 10	700
30	2,305 – 2,315	2,350 – 2,360	FDD	5, 10	2,3

Fonte: Adaptada de A. Toskala [4]

Tabela 3 - Frequências no modo TDD definidas pelo 3GPP para o LTE.

Banda de operação	Uplink (UL)	Downlink (DL)	Multiplexação	Canal (MHz)	Frequência (MHz)
33	1,900 – 1,920		TDD	5, 10, 15, 20	2,1
34	2,010 – 2,025		TDD	5, 10, 15	2,1
35	1,850 – 1,910		TDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1,9
36	1,930 – 1,990		TDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1,9
37	1,910 – 1,930		TDD	5, 10, 15, 20	1,9
38	2,570 – 2,620		TDD	5, 10, 15, 20	2,6
39	1,880 – 1,920		TDD	5, 10, 15, 20	1,9
40	2,300 – 2,400		TDD	5, 10, 15, 20	2,3
41	2,496 – 2,690		TDD	5, 10, 15, 20	2,5
42	3,400 – 3,600		TDD	5, 10, 15, 20	3,5
43	3,600 – 3,800		TDD	5, 10, 15, 20	3,7
44	703 – 803		TDD	5, 10, 15, 20	700

Fonte: Adaptada de A. Toskala [4]

Nos sistemas FDD, os tráfegos de DL e UL são transmitidos simultaneamente em frequências separadas. Com o TDD, as transmissões de DL e UL são alternadas na mesma frequência. Como exemplo, se o tempo para DL e UL for dividido em 1/1, o UL

utiliza metade do tempo e a média da potência para cada link é a metade da potência de pico. Como a potência de pico é limitada por regulamentações, o resultado é que para a mesma potência de pico, o modo TDD oferece uma menor cobertura que o modo FDD. As operadoras quando fazem uso do modo TDD, habitualmente configuram o sistema DL/UL em 3/1. Para se obter uma cobertura equivalente quando comparado à sistemas FDD, se faz necessário a instalação de 120% de eNodeBs a mais no modo TDD [5].

No Brasil a banda 7 (2600 MHz) já se encontra em operação e a banda 13 (700 MHz) está em fase de licitação pela Anatel. Como o LTE oferece a possibilidade de se operar em uma grande variedade de bandas, há uma possibilidade das operadoras liberarem espectro de operação de outras tecnologias como a do GSM (1800 MHz) e operarem também nesta faixa de frequência; este procedimento é chamado de “*refarming*”.

### 1.5.2. OFDM e OFDMA

O OFDM se tornou uma das principais técnicas utilizadas pelas tecnologias sem fio devido às suas propriedades como tolerância contra interferência inter-simbólica e boa eficiência espectral [5]. O OFDM é uma técnica baseada na Modulação por Multi Portadoras (MCM – *Multi Carrier Modulation*) e na Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM – *Frequency Division Multiplex*). A modulação por multi-portadoras divide a banda do sinal em portadoras paralelas que são chamadas subportadoras. Diferentemente dos sistemas tradicionais MCM, que utilizam subportadoras não sobrepostas, o OFDM utiliza subportadoras que são matematicamente ortogonais entre si, isto permite que cada informação possa ser enviada por subportadoras sobrepostas, onde cada uma delas pode ser extraída individualmente. Essa propriedade ajuda a reduzir interferências causadas por portadoras vizinhas e faz com que sistemas que utilizam o OFDM possuam melhor eficiência espectral [8]. A Figura 10 mostra a disposição das subportadoras na modulação FDM e OFDM.

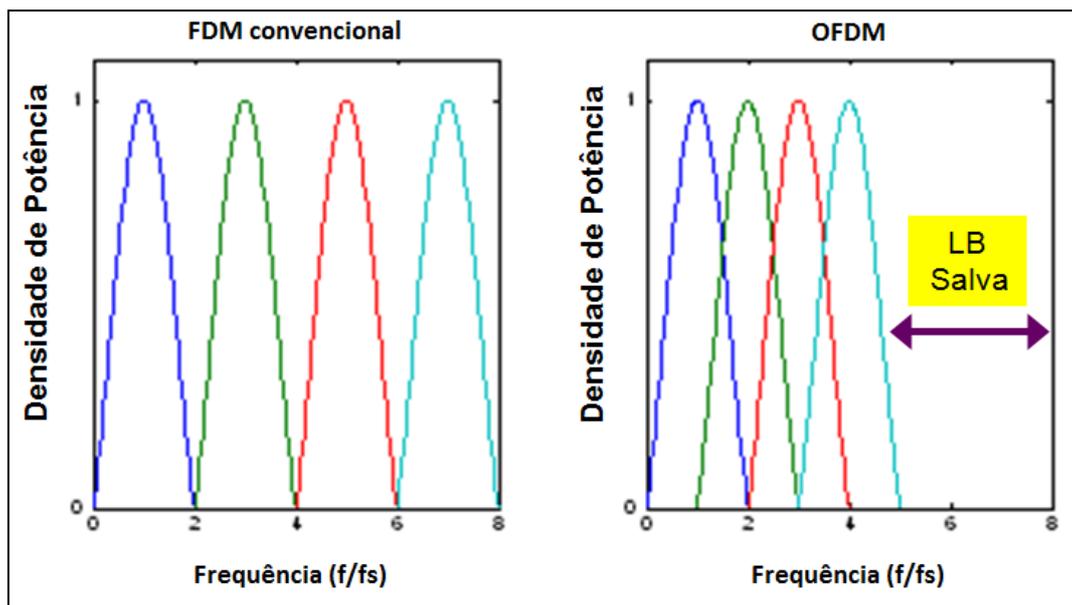


Figura 10 – Disposição das portadoras na modulação FDM e OFDM.

Fonte: Modificada de Nokia Siemens Networks

O LTE emprega a modulação OFDMA, que tem como base a modulação OFDM com subportadoras espaçadas em 15 kHz moduladas individualmente em QPSK, 16 QAM e 64 QAM. Cada grupo de 12 subportadoras forma o chamado “*resource block*”.

A Figura 11 mostra a diferença entre as técnicas de OFDM e OFDMA. No OFDM, os usuários compartilham as subportadoras por fatia de tempo. No OFDMA tradicional, a banda de frequência é destinada a um único usuário, enquanto no OFDMA empregado no LTE vários usuários compartilham a banda ao mesmo tempo, agrupada em pequenos blocos (*resource blocks*). Esta divisão em pequenos subcanais ajuda o OFDM a combater o efeito de desvanecimento seletivo.

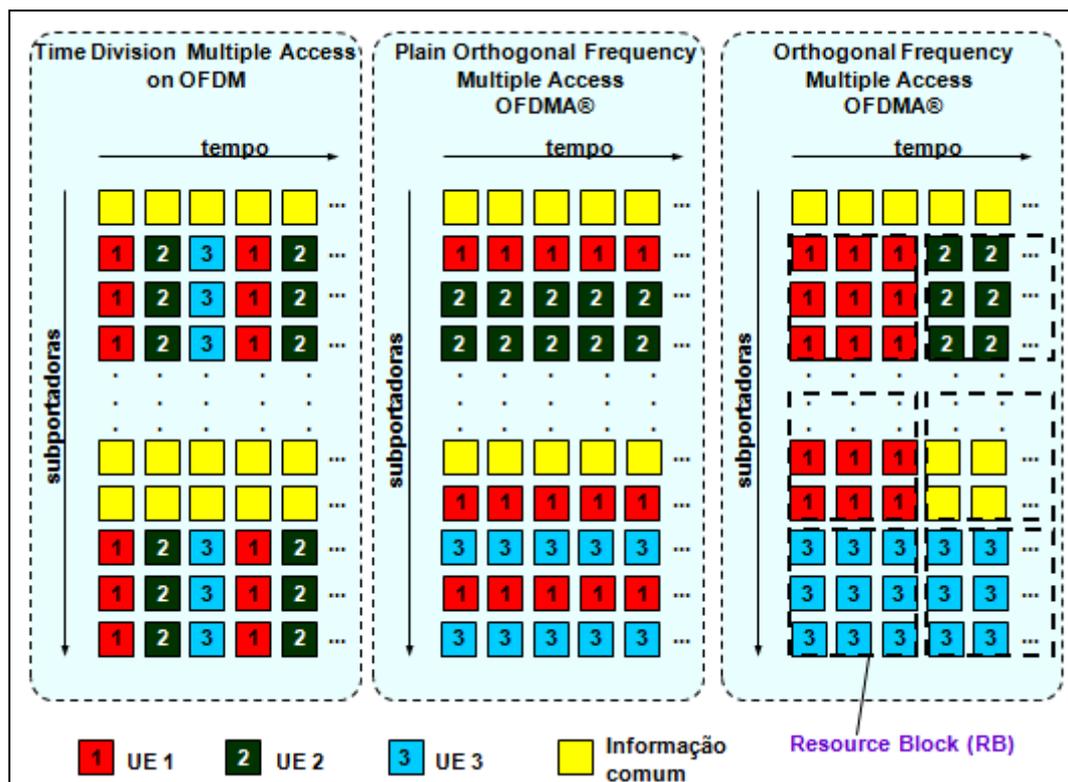


Figura 11 – Comparação entre as modulações OFDM e OFDMA.

Fonte: Modificada de Nokia Siemens Networks

O número de *resource blocks* está associado à banda disponível, conforme apresentado na Tabela 4. A duração de um símbolo OFDM é de 66,667  $\mu$ s e o prefixo cíclico padrão é de 4,7  $\mu$ s, logo, o tempo total de transmissão de um símbolo OFDM é de 71,367  $\mu$ s. O prefixo cíclico é transmitido antes de cada símbolo OFDM como medida de prevenção ao multi-percurso. Para aplicações onde existe grande degradação por multi-percurso, um prefixo cíclico de 16,67  $\mu$ s pode ser utilizado, no entanto este maior prefixo cíclico faz com que seja reduzida a vazão [5].

Tabela 4 - *Resource Blocks* e subportadoras [5].

Canal (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Subportadoras	72	180	300	600	900	1200

### 1.5.3. SC-FDMA

O LTE adotou a modulação SC-FDMA (*Single Carrier FDMA*) para o *uplink*, devido ao baixo valor do parâmetro (PAPR – *Peak-to-Average Power Ratio*) em comparação ao OFDMA, diminuindo a necessidade de transmissores complexos.

A Figura 12 compara a transmissão usando OFDMA e SC-FDMA. No OFDMA, os quatro símbolos QPSK são transmitidos paralelamente, sendo um em cada subportadora, e no SC-FDMA os quatro símbolos são transmitidos em série em quatro tempos distintos. No OFDMA, cada subportadora carrega somente informações de um símbolo específico. No SC-FDMA, cada subportadora contém informações de todos os símbolos transmitidos. No *uplink*, os dados são transmitidos também em 12 subportadoras, como no *downlink*, com o mesmo TTI (*Transmission Time Interval*) de 1 ms [5].

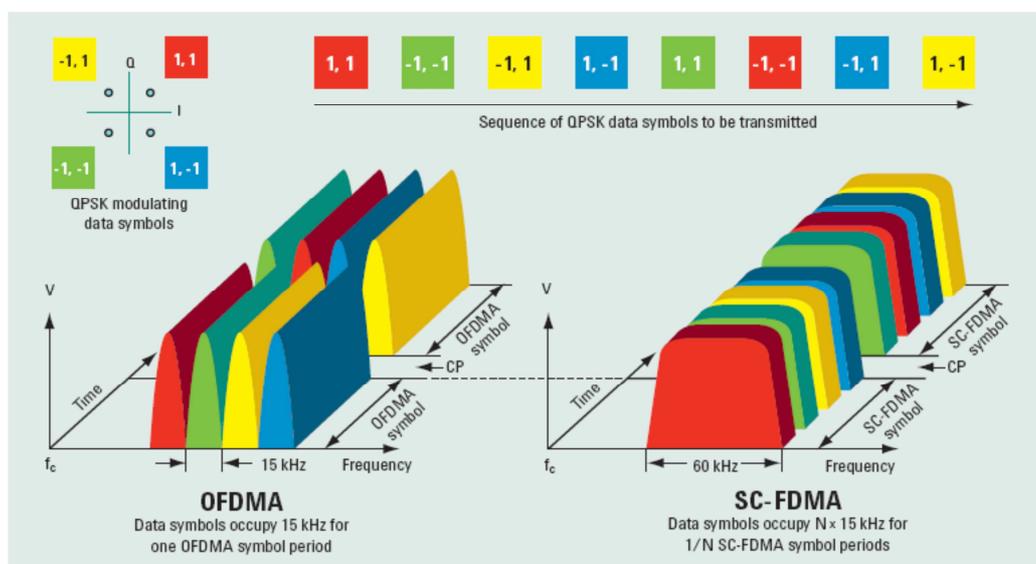


Figura 12 – Transmissão OFDMA x SC-FDMA.  
Fonte: Nokia Siemens Networks, modificada (2013)

### 1.5.4. Cálculo de vazão

A vazão teórica na camada física da eNodeB pode ser calculada levando-se em consideração o tempo de símbolo, a modulação empregada (QPSK, 16 QAM, 64 QAM), a taxa de código e o número de subportadoras disponíveis, conforme a Equação 1 [5]:

$$\text{Vazão} = \text{Número de Bits por Símbolo} \times \text{Taxa de Código} \times \text{Número de Subportadoras} / \text{Tempo de Símbolo}. \quad (1)$$

Podemos ver um exemplo de cálculo de vazão para uma largura de banda de 5 MHz e, sistemas de antenas SISO na Tabela 5.

Tabela 5 - Vazão para largura de banda de 5 MHz.

Modulação	Taxa de Códigos	Vazão (Mbps)
QPSK	1/2	4,2
QPSK	3/4	6,31
16QAM	1/2	8,41
16QAM	3/4	12,61
64QAM	1/2	12,61
64QAM	2/3	16,81
64QAM	3/4	18,92
64QAM	5/6	21,02

Por exemplo, como o tempo de um símbolo OFDM é igual a 71,367  $\mu$ s, ao usarmos a configuração relativa à primeira linha da Tabela 5: modulação QPSK (2 bits/símbolo), taxa de código de 1/2 e número de subportadoras igual a 300 (ver Tabela 4) , obtemos 4,2 Mbps através da Equação 1.

Os *overheads* dos cabeçalhos para controle reduzem a taxa útil alcançada. Estimando um valor de 15% de *overhead* para os canais de controle e sincronismo, será possível alcançar, com 5 MHz de largura de banda, modulação de 64 QAM, taxa de código de 5/6 e sistemas de antenas SISO, 17,87 Mbps.

## 2. O Protocolo TCP

Nesse capítulo são descritas as principais características do protocolo TCP: o controle de erros, o controle de fluxo e o controle de congestionamento. Na sequência é realizada uma breve descrição das versões ou tipos de TCP, com suas funcionalidades e aplicações. E por fim é abordado o comportamento do protocolo TCP em redes sem fio (IEEE 802.11, 2G, 3G e 4G), bem como mecanismos para melhorar o seu desempenho neste tipo de rede.

### 2.1. Introdução

O protocolo de controle de transmissão, TCP (*Transmission Control Protocol*), foi projetado especificamente para oferecer um fluxo de *bytes* fim-a-fim confiável em uma rede interligada não confiável [9].

O TCP é um protocolo da camada de transporte, orientado a conexão e com garantia de comunicação confiável e controle de congestionamento fim-a-fim. A transmissão confiável é obtida através da utilização de mensagens de reconhecimento positivo, ou *acknowledgments* (ACKs), temporizadores, números de sequência e paralelismo [10], [11].

O TCP foi definido formalmente na RFC 793, em setembro de 1981. Com o passar do tempo, diversas melhorias foram realizadas, e vários erros e inconsistências foram corrigidos. Na Tabela 6 está apresentado um resumo com as principais RFCs e suas descrições.

Tabela 6 – Principais RFCs relacionadas ao TCP.

RFCs	ANO	Descrição
793	1981	TCP original
2001 / 2581	1997	TCP Tahoe
2581	1999	TCP Reno
1323	1992	<i>window scaling</i> , otimização do RTT
2582	1999	TCP New Reno
4614	2006	<i>Roadmap</i> das RFCs

As principais características do TCP são o estabelecimento e o término de conexões, o controle de erros, o controle de fluxo e o controle de congestionamento.

## 2.2. O Estabelecimento e o Término de Conexões

O protocolo TCP negocia o início das conexões antes de enviar dados entre os *hosts*, por isto é chamado de protocolo orientado a conexão.

O estabelecimento das conexões é executado através do mecanismo chamado de *three-way handshake*, onde são trocadas três mensagens cujo objetivo principal é a informação dos números de sequência iniciais em ambos os sentidos da conexão. Além dessa informação, é trocada a informação sobre o tamanho das janelas de recepção de cada um dos *hosts*, sobre o tamanho máximo dos segmentos (MSS – *Maximum Segment Size*) e sobre o fator de escala da janela de recepção (*Window scale*).

O término das conexões é executado através do mecanismo de *four-way handshake*, sendo que qualquer um dos *hosts* pode iniciar este procedimento.

## 2.3. O Controle de Erros

Durante a fase de transferência de dados, o controle de erros – que compreende a detecção e a recuperação de erros – é feito com base na numeração de sequência e no temporizador de retransmissão (*Retransmission Timer*), que estará ativo sempre que houver segmentos a serem confirmados.

Se o temporizador de retransmissão se esgotar, ocasionando um *timeout*, é retransmitido o primeiro dos segmentos não confirmados e o temporizador será reinicializado. O temporizador também é reinicializado após o recebimento de um ACK que confirme novos dados relacionados ao segmento mais antigo não reconhecido. O temporizador é parado quando todos os dados receberem confirmação.

O temporizador trabalha com tempo de *back-off* exponencial, e tem valores típicos de 1,5, 3, 6, 12, 24 e 48s e limite máximo de 64s.

## 2.4. O Controle de Fluxo

A função principal do controle de fluxo é impedir que um transmissor rápido sobrecarregue um receptor lento. O protocolo TCP realiza o controle de fluxo através do princípio da janela deslizante, adaptando o ritmo de transmissão às capacidades de escoamento do receptor e da rede, reduzindo as perdas e a sobrecarga [9].

Cada segmento TCP contém um campo de 16 bits chamado tamanho da janela de recepção, que indica o número de bytes que o receptor pode aceitar sem estourar o buffer de recepção. Assim, o número máximo de segmentos que o TCP pode enviar sem receber um ACK é limitado pelo tamanho da janela de recepção. Desta forma o tamanho máximo da janela é de no máximo 64 *kbytes*. Isto se torna um inconveniente para o caso de conexões chamadas de *long flat pipes*, que é o caso de conexões terrestres de alta velocidade (como as de Gigabit-Ethernet) ou conexões via satélite (com atraso de centenas de ms), gerando o esgotamento da janela de recepção. De modo a resolver este problema, foi criado um mecanismo de multiplicação do valor da janela de recepção por um fator negociado na fase de estabelecimento de conexão, chamado *Window scale* que está descrito na RFC 1323 [10].

## 2.5. O Controle de Congestionamento

O controle de congestionamento visa adaptar a taxa de envio de dados à carga da rede, e é composto dos algoritmos partida lenta (*slow-start*) e prevenção de congestionamento (*congestion avoidance*).

A partida lenta é usada no início de uma conexão TCP. O objetivo desta fase é lentamente fazer com que a taxa de transmissão da fonte convirja para capacidade de transmissão disponível na rede, de forma a aproveitar toda a capacidade da rede. O tamanho da janela de congestionamento, CWND, começa em 1 e aumenta de 1 segmento a cada ACK recebido. O crescimento é exponencial até atingir o limite *SSThresh* (*Slow Start Threshold*), ou quando ocorre a perda de um segmento detectada através do recebimento de três ACKs duplicados. No caso de uma perda por estouro do temporizador, continua-se na fase de partida lenta com CWND igual a 1.

Depois da fase da partida lenta, o TCP passa para a fase de prevenção de congestionamento, onde atua o algoritmo AIMD (*Additive-Increase, Multiplicative-Decrease*) para controlar o tamanho da janela de congestionamento. Primeiro, a janela CWND cresce linearmente com taxa de  $1/\text{CWND}$  a cada ACK recebido, e quando uma perda é detectada por ACKs duplicados, o *SSThresh* é ajustado para a metade do valor atual da janela de congestionamento, a janela decresce na taxa  $\frac{1}{2}$  CWND e a fase de prevenção de congestionamento começa neste novo patamar. Quando a perda é detectada por *timeout*, o *SSThresh* também é ajustado para a metade do valor atual da

janela de congestionamento e a janela é colocada em 1 segmento. Então a partida lenta é utilizada novamente até que se atinja o *SSThresh* [10].

## 2.6. Tipos de TCP: *Tahoe*, *Reno*, *New Reno* e *WestwoodPlus*

Como vimos anteriormente o TCP dispõe de mecanismos de controle de fluxo e controle de congestionamento, evitando o transbordamento do receptor e da rede, reduzindo o número de retransmissões.

Os diversos mecanismos discutidos anteriormente foram sendo incorporados no protocolo TCP ao longo de seus diferentes tipos ou versões (TCP *flavors*). A seguir são apresentadas as versões *Tahoe*, *Reno*, *New Reno* e *Westwood Plus*, disponíveis no software de simulação de rede NS3.

### 2.6.1. TCP *Tahoe*

O TCP *Tahoe* foi uma das primeiras soluções fim a fim para resolver o problema de controle de congestionamento proposto por Jacobson. A solução é baseada na RFC 793 e consiste de três principais algoritmos: *slow-start*, *congestion avoidance* e *fast retransmit*.

### 2.6.2. TCP *Reno*

O TCP *Reno* melhora o desempenho do controle de congestionamento do TCP *Tahoe*, principalmente nos enlaces com alto valor de BDP (*Bandwidth Delay Product*). O TCP *Reno* possui quatro algoritmos básicos de controle de congestionamento: *slow-start*, *congestion avoidance*, *fast retransmit* e *fast recovery*.

O seu funcionamento de forma reduzida, é descrito a seguir. O TCP *Reno* inicializa a sua janela de congestionamento (CWND) com um segmento, e cresce exponencialmente durante a fase *slow-start* até atingir o *SSThresh*, quando passa para a fase *congestionavoidance* e seu crescimento segue de forma linear. Ao receber três *ACKs* duplicados, retransmite esse segmento (*fast retransmit*) e reduz a janela à metade (*fast recovery*). Em caso de *timeout*, volta para fase de partida lenta.

O TCP *Reno* apresenta melhora significativa em relação ao TCP *Tahoe*, mas não tem um bom desempenho quando múltiplos segmentos são perdidos em uma mesma janela.

### 2.6.3. TCP *New Reno*

O TCP *New Reno* consiste numa modificação sutil do algoritmo *fast recovery* do TCP *Reno*, resultando num alto desempenho na presença de múltiplas perdas de segmentos numa mesma janela de transmissão. No *Reno*, ACKs parciais fazem com que o TCP saia do algoritmo *fast recovery* (pois um segmento só é considerado perdido após o recebimento de três ACKs ou após *timeout*). O *New Reno* considera ACKs parciais, recebidos durante o *fast recovery*, como indicativo de que o segmento imediatamente após o confirmado pelo ACK (na sequência) foi perdido e deve ser retransmitido. Assim quando múltiplos segmentos são perdidos numa mesma janela, o *New Reno* consegue se recuperar evitando o *timeout*, retransmitindo um segmento perdido por RTT até que todos os segmentos perdidos da janela tenham sido recuperados. O *New Reno* permanece no *fast recovery* até que todos os segmentos pendentes sejam confirmados.

### 2.6.4. TCP *Westwood Plus*

O protocolo TCP *Westwood Plus* [12] é uma derivação do protocolo *Westwood*, que modifica o algoritmo de controle da janela de congestionamento do lado do transmissor usando uma estimativa de banda.

No TCP *Westwood*, o transmissor estima constantemente a banda de transmissão através da taxa de recepção de ACKs. Após uma ocorrência de congestionamento (recepção de três ACKs duplicados ou *timeout*), a estimativa obtida é utilizada para computar a janela de congestionamento e o novo patamar do *SSThresh* do *slow-start*.

De forma a evitar flutuações, o *Westwood* possui dois níveis de estimativa de banda. O primeiro nível estima a banda instantaneamente através da recepção dos pacotes ACKs, conforme a Equação 2:

$$b = \frac{d}{\Delta}, \quad (2)$$

onde,

$b$  é a banda estimada;

$d$  é quantidade de dados reconhecidos pelo ACKn no tempo  $t_n$ ;

$\Delta$  é o tempo decorrido do último ACK recebido.

No segundo nível de estimativa, o valor instantâneo calculado é passado por um filtro passa baixa:

$$B = \alpha(\Delta) \cdot B^{-1} + [1 - \alpha(\Delta)] \cdot \left( \frac{b + b^{-1}}{2} \right) \quad (3)$$

Onde,

$B$  é banda estimada;

$\alpha(\Delta)$  é o coeficiente da média, em função de  $\Delta$ ;

$b$  e  $b^{-1}$  é a banda estimada recente e a anterior, respectivamente;

$B$  e  $B^{-1}$  é a estimativa calculada recente e a anterior, respectivamente.

Alguns experimentos mostraram um bom nível de estimativa de banda pelo *Westwood*, no entanto para algumas condições de rede este cálculo pode ser bem errado; por exemplo, na presença de ACKs comprimidos. Quando ACKs são atrasados e agrupados devido ao congestionamento do caminho reverso, a estimativa de banda instantânea das amostras leva para uma superestimação da banda. Por esta razão, uma revisão foi proposta no TCP *Westwood Plus* e o algoritmo foi modificado realizando a estimativa de banda a cada RTT. Na Equação 4  $d$  é a quantidade de dados reconhecidos (*acknowledged*) no último RTT, e  $\Delta$  é o RTT. Esta estimativa de banda realizada no último RTT é passada num filtro conforme a Equação 4, com o fator  $\alpha = 0,9$ .

$$B = \alpha \cdot B^{-1} + (1 - \alpha) \cdot b \quad (4)$$

## 2.7. Propostas para o TCP em Redes sem Fio

Os protocolos de transporte como o TCP, que implementam controle de congestionamento, devem ser independentes das tecnologias subjacentes das camadas de rede e de enlace. Esta é uma boa teoria, mas na prática há a situação em que o controle de congestionamento do TCP tem uma tendência a falhar. Quando um enlace descarta pacotes em uma taxa relativamente alta devido a erros de bits, algo muito comum nos enlaces sem fios, o TCP interpreta isso erroneamente como um sinal de congestionamento. Conseqüentemente, o emissor TCP reduz sua velocidade, o que normalmente não tem efeito sobre a taxa de erros de bits, de modo que a janela de transmissão pode se reduzir a um único pacote. Neste ponto, a vazão alcançada pelo TCP será reduzida para um pacote por tempo de ida e volta (RTT), o que pode ser muito menor do que a taxa apropriada para uma rede que não está realmente experimentando congestionamento [13].

Para funcionar bem, as únicas perdas de pacotes que o algoritmo de controle de congestionamento deve observar são perdas devidas à largura de banda insuficiente, e não perdas devidas a erros de transmissão. Várias soluções foram propostas para resolver este problema de perdas de pacotes não relacionadas a congestionamento em redes sem fio, e são divididas em cinco grupos: mecanismos fim-a-fim, conexão dividida, protocolo TCP Snoop, sinalização entre camadas e controle na camada de enlace [14].

### 2.7.1. Mecanismos Fim-a-Fim

Os mecanismos fim-a-fim só têm efeito nos *hosts* e não interferem nos nós intermediários, mantendo o princípio fim-a-fim do TCP de modificar apenas o transmissor ou receptor. O TCP *Westwood* e o *Westwood Plus* proposto por Mascolo e outros, encontram-se neste grupo [12], [15].

### 2.7.2. Conexão Dividida

Esse método supõe o uso de uma estação base (BS - *Base Station*) no acesso sem fio. A ideia dessa abordagem é dividir a conexão TCP entre o receptor e o transmissor em duas conexões diferentes na estação base: uma entre a parte móvel e a estação base e outra entre a BS e a parte fixa. O *indirect* TCP (I-TCP) [16] pertence a esse grupo.

Dentre os principais problemas desse grupo estão a quebra da semântica fim-a-fim do TCP e a sobrecarga (*overhead*) causada pelo duplo processamento do TCP na BS.

### **2.7.3. TCP Snoop**

O TCP Snoop [17] trata-se de um agente *proxy* instalado na estação base, que realiza retransmissões locais na parte sem fio. O TCP *Snoop* esconde da parte fixa as perdas no enlace sem fio. Quando um agente detecta uma perda, ele retransmite o segmento TCP perdido para a estação móvel, espera pelo ACK correspondente e o envia para a parte fixa antes que esta descubra a perda do segmento [14]. Este protocolo não é apropriado em caso de encriptação dos cabeçalhos dos segmentos TCP (por exemplo, usando o IPSEC), e pode ser um problema para redes LTE que utilizam IPSEC para garantir a segurança das informações dos dados dos usuários.

### **2.7.4. Sinalização entre Camadas**

Nessa abordagem, as camadas de enlace e de rede nos nós intermediários ou na estação móvel informam o transmissor TCP na parte fixa sobre o estado do enlace sem fio (ex.: perda de pacote, *handovers*, etc); por exemplo: o transmissor TCP recebe informação sobre *handover* e inicia o algoritmo *fast retransmit*, evitando a espera ociosa pela retransmissão por *timeout*.

### **2.7.5. Controle na Camada de Enlace**

A proposta de realizar o controle de erros na camada de enlace, a estação base realiza o pedido de retransmissões para a estação móvel num intervalo de tempo mais rápido que o TCP possa enxergar. Esta tem sido a proposta adotada pelas tecnologias sem fio (IEEE 802.11, 2G, 3G e 4G), com algumas adaptações e melhorias dependendo da tecnologia.

## **2.8. TCP em Redes Sem Fio (IEEE 802.11 e Redes Celulares)**

### **2.8.1. TCP em Redes IEEE 802.11**

As redes IEEE 802.11 utilizam a camada de enlace para retransmitir várias vezes, se for preciso, antes de informar uma perda de pacote à camada superior.

Os dois mecanismos de recuperação de perdas, controle de congestionamento da camada de transporte e controle de erros da camada de enlace, trabalham conjuntamente em escalas de tempo diferentes. As retransmissões da camada de enlace acontecem na ordem de microssegundos a milissegundos para enlaces sem fio, como os do IEEE 802.11. Os *timers* da camada de transporte disparam na ordem de milissegundos a segundos. Isto faz com que os enlaces sem fios detectem as perdas de quadros e os retransmitam para reparar os erros de transmissão muito antes que a perda de pacote seja deduzida pela entidade de transporte [9].

Um segundo problema do controle de congestionamento em enlaces sem fio é a capacidade variável, limitada pela largura de banda disponibilizada ao usuário que está relacionada ao tipo de modulação e à relação sinal ruído. Uma estratégia possível é não se preocupar com este problema, já que os algoritmos de controle de congestionamento tratarão deste problema. Porém como existe muita variabilidade nos enlaces sem fio, os protocolos de transporte projetados para enlaces com fio podem ter dificuldades de acompanhar, e oferecem um desempenho fraco. A solução neste caso é um protocolo de transporte projetado para enlaces sem fio [9].

### 2.8.2. TCP em redes celulares 2G, 3G e 4G

Conforme explicado anteriormente, o protocolo TCP desenvolvido para operar em redes cabeadas, apresenta baixo desempenho sobre canais sem fio. Não é diferente com as redes móveis celulares, devido principalmente às características de desvanecimento seletivo, sombreamento, altas taxas de erros provenientes da interface aérea, *handovers* ou desconexões não planejadas [18]. Este aspecto causa problemas de desempenho no protocolo TCP, o qual é utilizado amplamente pelos serviços de aplicação oferecidos na *Internet*.

As tecnologias de dados da rede 2G, GPRS e EDGE, têm o seu próprio mecanismo ARQ (*Automatic Repeat Request*) projetado na camada RLC entre a estação móvel e a BSC, apresentados na Figura 13. Alguns problemas foram descobertos no sentido *downlink*, tais como: *Slow Start* muito alto ( $> 1$  s), compressão de ACKs (devido ao agrupamento de ACKs e enviados em grupos de quatro), enfileiramento excessivo no GGSN (devido a sua baixa largura de banda) [14].

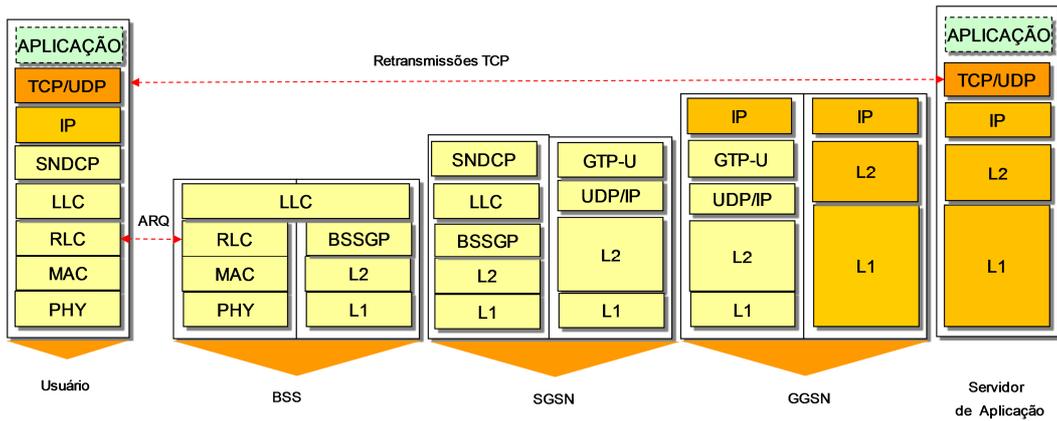


Figura 13 – Pilhas de protocolos do GRPS/EDGE.

As tecnologias de dados da rede 3G e 4G possuem dois mecanismos de correção de erros, ARQ na camada RLC e HARQ (*Hybrid ARQ*) na camada MAC. A diferença está no fato de no sistema 4G as funções de RLC residirem na eNB, enquanto no 3G se encontram na RNC (*Radio Network Controller*). Isto faz com que no 4G seja mais eficiente a correção de erros provenientes da interface aérea, disparando mais rápido o mecanismo de retransmissão de pacotes, sem necessidade de atuação das retransmissões do TCP, conforme a Figura 14.

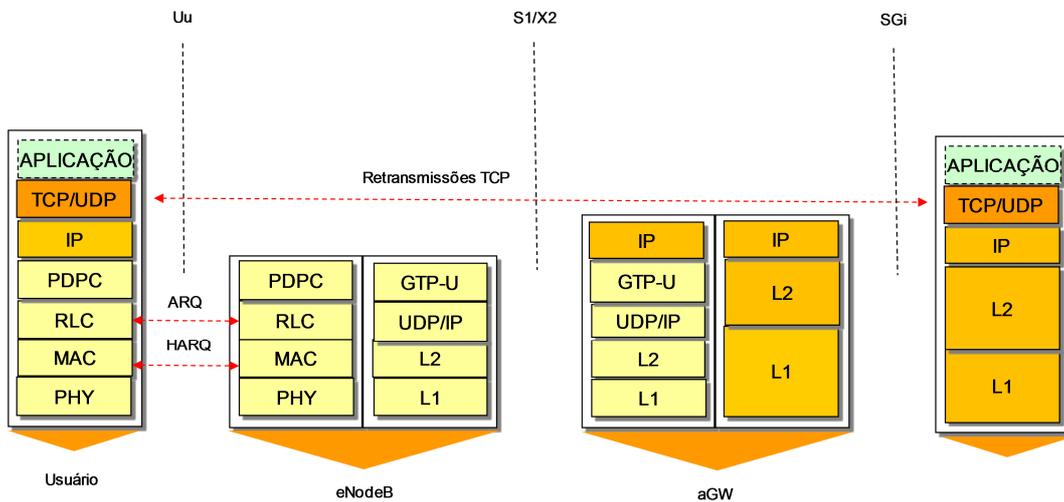


Figura 14 – Pilhas de protocolos do LTE.

### 3. SIMULAÇÕES

Neste capítulo apresenta e discute os resultados dos estudos realizados no simulador NS-3, versão ns 3.17. Primeiramente são feitas considerações sobre a ferramenta NS-3 e o módulo LTE, os objetivos dos estudos, os cenários das simulações e as métricas de desempenho.

#### 3.1. *Software de Simulação*

O *software* utilizado para simulação da rede LTE é o *Network Simulator* – versão 3, mais conhecido como NS-3. O NS-3 é um simulador de redes baseado em eventos discretos, desenvolvido especialmente para pesquisa e uso educacional.

O NS-3 constitui uma aplicação que permite simular diversos cenários de redes, desde os mais simples aos mais complexos.

O NS-3 implementa as abstrações de nós e enlaces, possui uma variedade de modelos de tecnologias disponíveis para simulação de redes sem fio e cabeadas para as camadas 1 e 2, modelos para as camadas de rede, transporte e aplicação da arquitetura TCP/IP, além de utilitários para extração, visualização e animação dos resultados.

O NS-3 possui o módulo LTE que faz parte do projeto LENA [19], desenvolvido pelo CTTC – Centro Tecnológico de Telecomunicações da Catalunha e pela empresa Ubiquisys (empresa do grupo Cisco), com o objetivo de desenvolver soluções e algoritmos aplicados às redes LTE.

O módulo LTE do NS-3 possui um conjunto de protocolos específicos para LTE (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY), onde são conectados os elementos de rede de acesso UE (*User Equipment*), eNB (*Evolved NodeB*) aos elementos de Core SGW (*Serving GateWay*), PGW (*Packet data network GateWay*) e MME (*Mobility Management Entity*).

O módulo LTE herda as classes e as funcionalidades do NS-3, facilitando a integração com outras redes e módulos existentes no NS-3, como redes cabeadas ou sem fio (*Wi-Fi* ou *WiMax*).

O NS-3 juntamente com o módulo LTE permite que sejam criados os elementos de rede, simulados cenários variados e observados os resultados em diversos níveis de rastreamento dos protocolos (PDCP, RLC, MAC, PHY) ou no nível de *socket* dos nós

envolvidos. Estas facilidades permitem ao usuário se concentrar num determinado cenário e observar o comportamento de uma camada dos protocolos LTE ou mesmo dos protocolos TCP/IP.

O NS-3 atualmente disponibiliza as seguintes versões de TCP para simulação: *Tahoe*, *Reno*, *New Reno*, *Westwood* e *Westwood Plus*. Não há implementação real da versão *Westwood*, devido à sua deficiência na presença de ACKs comprimidos, conforme comentado na seção sobre TCP.

A Figura 15 mostra a topologia básica do módulo LTE com os elementos de rede LTE e uma interligação com um grupo de servidores externos (*remote hosts*).

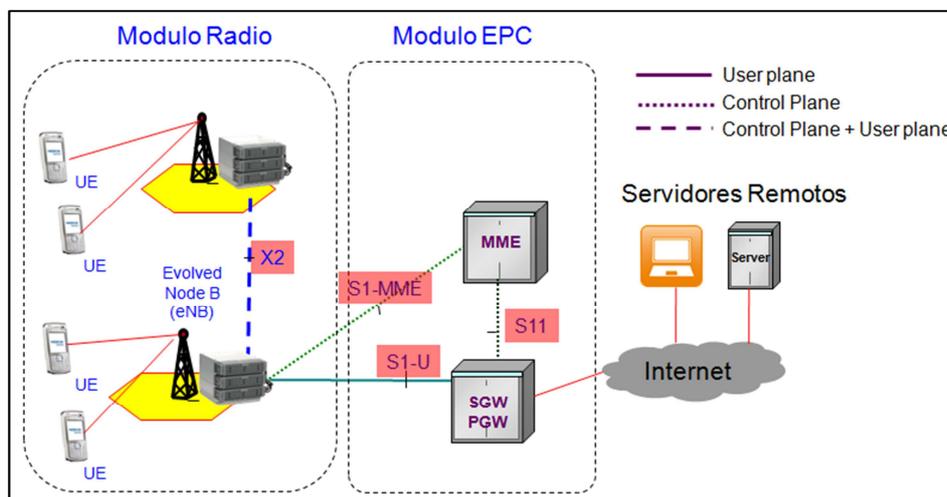


Figura 15 – Topologia básica do módulo LTE do NS-3.

### 3.2. Objetivos

O objetivo principal dos estudos realizados foi avaliar o desempenho dos protocolos TCP/IP sobre a rede LTE num ambiente fim-a-fim através de simulações.

Neste sentido foram definidos os seguintes cenários e métricas de avaliação:

- avaliar o desempenho dos protocolos TCP/IP (*Tahoe*, *Reno*, *New Reno*, e *Westwood Plus*), através da vazão média numa topologia cliente-servidor e na presença de erros;
- avaliar o desempenho dos protocolos TCP/IP (*Tahoe*, *Reno*, *New Reno*, e *Westwood Plus*), através da vazão média variando o atraso do *backbone*;

- avaliar o desempenho dos protocolos TCP/IP (*Tahoe*, *Reno*, *New Reno*, e *Westwood Plus*), através da vazão média variando a largura de banda do *backbone*;
- avaliar a janela de congestionamento numa topologia cliente-servidor e na presença de erros;
- avaliar o índice de justiça numa topologia *butterfly*, variando o número de terminais (cliente) e servidores.
- avaliar o desempenho dos protocolos TCP, variando os modos RLC AM e RLC UM.

### 3.3. Cenários de Simulação

Com objetivo de estudar o comportamento dos protocolos TCP sobre a rede LTE, foi escolhido um cenário básico cliente-servidor utilizando o NS-3, e representado na Figura 16.

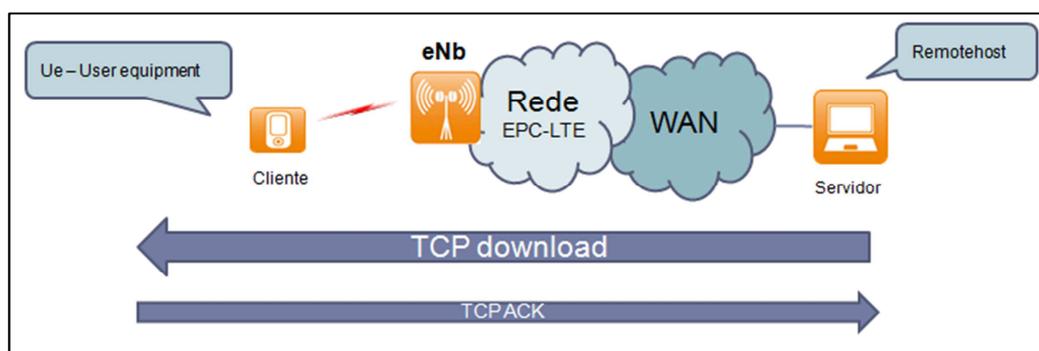


Figura 16 – Cenário básico utilizado nas simulações.

Neste cenário, foi avaliado inicialmente o desempenho dos protocolos TCP: *Westwood Plus*, *Tahoe*, *New Reno* e *Reno* (todos os *flavors* atualmente disponíveis na versão ns 3.17), através da vazão média obtida da aplicação *BulkSend* (simula uma aplicação FTP) no sentido *Downlink*. De forma a não interferir no desempenho dos protocolos TCP, inicialmente foi escolhido o modo RLC sem reconhecimento (UM – *Unacknowledged Mode*) e foram desabilitados os controles de erros da camada física e o HARQ da camada MAC. Posteriormente esses controles foram habilitados (Seção 3.5.6).

O primeiro cenário foi definido conforme a Figura 17, onde o cliente é representado pelo terminal do usuário (UE) e o servidor pelo *Remote Host*. O UE está conectado à estação rádio base, eNB (*Evolved NodeB*), a uma distância fixa de 500 m. O servidor se conecta à rede LTE através de um Gateway, num enlace WAN (*Wide Area Network*) ponto-a-ponto com largura de banda de 100 Gbps e atraso de 1 ms. O link S1u entre a eNB e o *Gateway* (SGW/PGW) tem os valores *default*, com largura de banda de 1 Gbps e sem atraso. Foi escolhido um valor de 5 MHz de banda ( $RB = 25$ ), onde em teoria pode-se chegar a no máximo 21 Mbps. Neste cenário, o gargalo se encontra na interface aérea.

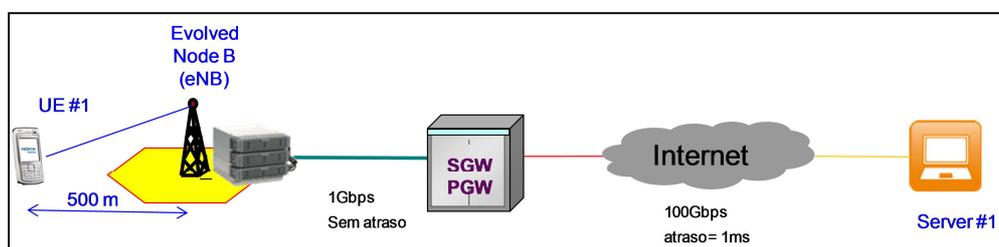


Figura 17 – Cenários 1 e 2 de simulação.

Foi escolhida a classe *Rate Error Model* do NS-3 que oferece a possibilidade de variar a taxa de perdas de pacotes através de uma variável aleatória com distribuição uniforme e esta perda foi introduzida no enlace ponto-a-ponto entre o servidor e a rede LTE. A taxa de erros de pacotes (PER – *Packet Error Rate*) foi variada de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$ .

Em cada simulação realizada, um fluxo TCP com duração de 60 s foi gerado.

### 3.4. Parâmetros

Foram utilizados os valores padrão dos parâmetros de sistema do NS-3, com exceção dos parâmetros descritos na Tabela 7 para simulação.

Tabela 7 – Parâmetros de sistema para simulação.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	Perda por atenuação em função da distância (Modelo Friss)
Largura de Banda para Uplink	5 MHz ( ou RB = 25)
Largura de Banda para Downlink	5 MHz (ou RB = 25)
Configuração de Antenas	SISO
Modo RLC	UM – Sem reconhecimento
Controle de erro PHY	Desativado
Controle de erro dados	Desativado
Controle HARQ	Desativado
MAC Scheduler	Proportional Fair
Potência de Transmissão UE	24 dBm
Figura de Ruído UE	9 dB
Potência de Transmissão eNB	32 dBm
Figura de Ruído eNB	5 dB
TTI	1 ms
MSS	536 bytes, 1500 bytes
TCP	<i>Westwood Plus, Tahoe, New Reno, Reno</i>
Tempo de simulação	60s

### 3.5. Resultados

#### 3.5.1. Primeiro Estudo: Vazão versus Perdas de Pacotes

Os resultados foram obtidos considerando cinco amostras de cada simulação e intervalos de confiança de 99% para média.

O primeiro gráfico mostrado na Figura 18 apresenta a média da vazão dos tipos de TCP em relação à probabilidade da perda de pacotes variando de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$ , com MSS = 536 bytes. Podemos observar que todas as variantes do TCP iniciam com valores de vazão entorno de 16 Mbps (valor máximo obtido no simulador NS3 com esta topologia), quando a taxa de erro é inferior a  $10^{-4}$ . O protocolo *Westwood Plus* se destaca em relação aos outros protocolos ao obter maiores valores de vazões. Isto ocorre, pois o *Westwood Plus* determina os valores da janela de congestionamento e do *SSThresh* em função da estimativa de banda e não de um valor conservativo estático como nos outros *flavours* avaliados [20].

Percebemos também uma semelhança no desempenho dos protocolos TCP *New Reno* e *Reno*; isto ocorre porque o protocolo *New Reno* melhora o seu desempenho em relação ao *Reno* somente em casos de múltiplos erros ocorrendo na mesma janela de transmissão. Como no nosso cenário o modelo de erro tem uma distribuição uniforme, a probabilidade de ocorrerem múltiplos erros na mesma janela é pequena.

Como era de se esperar o protocolo *Tahoe* apresenta o pior desempenho em relação aos outros protocolos estudados. Isto ocorre porque o *Tahoe* na presença de ACKs duplicados ou *timeout* sai da fase de *congestion avoidance* e volta para a fase *slow start*, sendo mais agressivo o fechamento da janela de transmissão do que o do *New Reno* e *Reno* que empregam o mecanismo de *fast recovery*.

Observa-se uma diminuição da vazão para todos os protocolos TCP com o aumento da taxa de erros, como esperado.

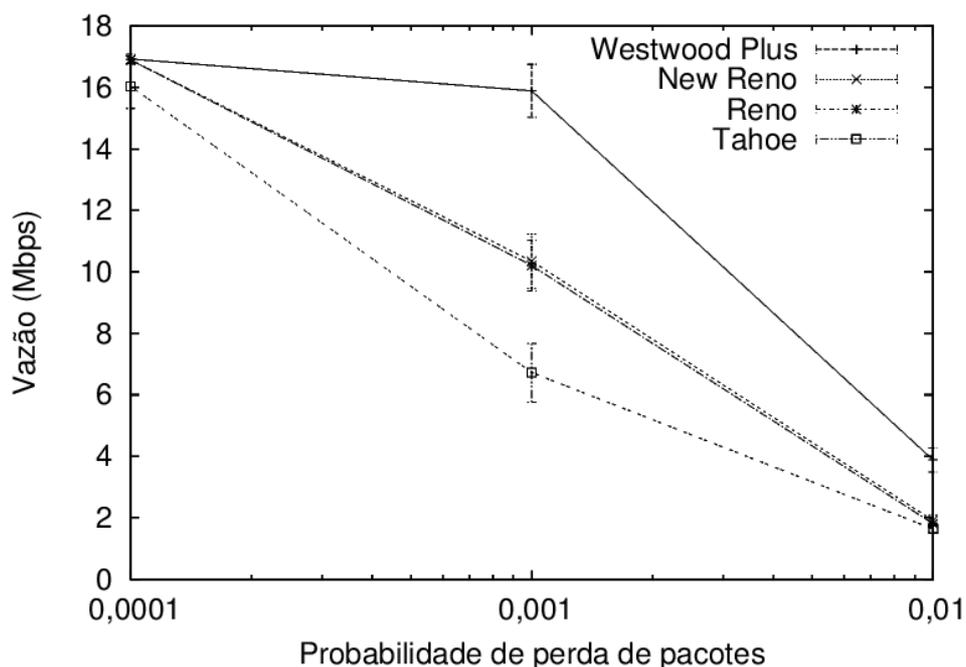


Figura 18 – Vazão x perdas de pacotes, MSS = 536 bytes.

O segundo gráfico, mostrado na Figura 19, apresenta valores a média das vazões dos tipos de TCP em relação à probabilidade da perda de pacotes variando de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$ , com MSS = 1500 bytes. Podemos observar que a vazão é superior à apresentado na Figura 18 com MSS = 536 para todos os tipos de TCP. Isto é esperado, pois a vazão é diretamente proporcional ao tamanho dos pacotes enviados.

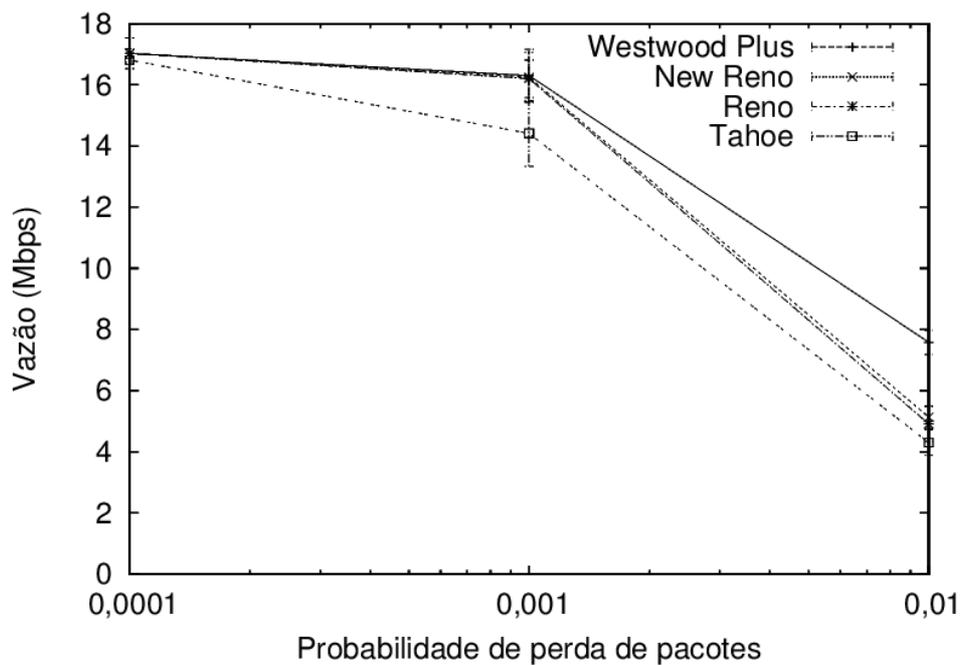


Figura 19 – Vazão x perdas de pacotes, MSS = 1500 bytes.

### 3.5.2. Segundo Estudo: Vazão versus Atraso

O segundo estudo tem o objetivo de avaliar o desempenho dos protocolos TCP em relação ao aumento do atraso no enlace do *backbone*. O cenário escolhido é equivalente ao da Figura 17, porém fixou-se o valor de taxa de erros em  $10^{-3}$  no enlace do *backbone*. Variou-se o atraso no *backbone* em 1, 10 e 20 ms.

Os resultados são mostrados na Figura 20. Percebe-se uma grande queda na vazão de todos os protocolos, caindo para quase a metade com o atraso de 10 ms. Mais uma vez o protocolo Westwood foi melhor do que os outros. Era razoável esperar uma queda na vazão de todos os protocolos, pois aumentando-se o RTT diminui-se a vazão.

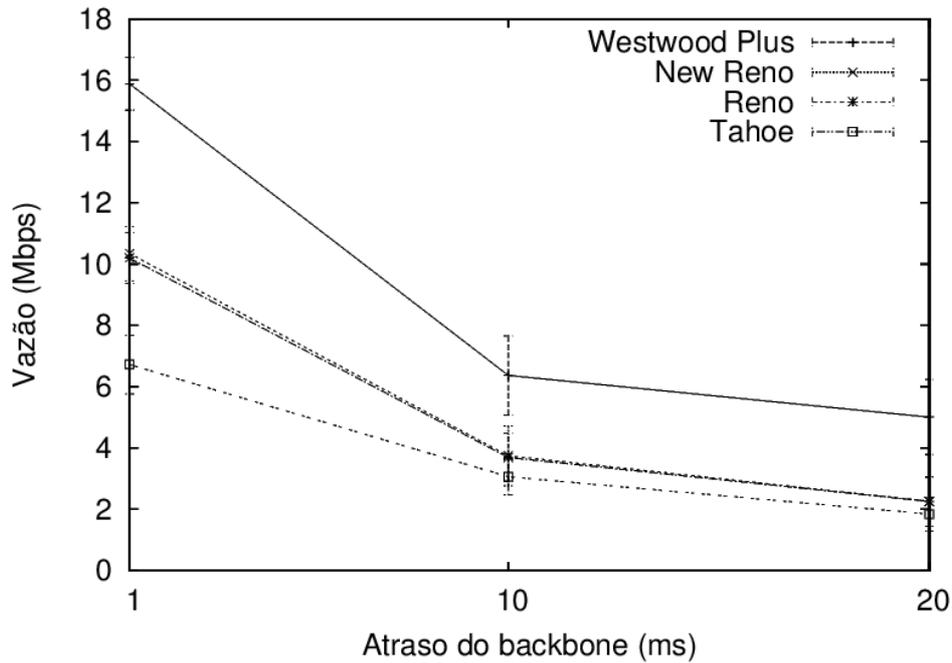


Figura 20 – Vazão x Atraso no *Backbone*.

### 3.5.3. Terceiro Estudo: Vazão versus Largura de Banda

O terceiro estudo visa observar o comportamento da vazão com a variação da banda do *backbone*. Como o gargalo encontra-se na interface aérea (~16 Mbps), só é possível observar alguma limitação na vazão quando o valor da banda do *backbone* é menor do que este valor. É possível observar na Figura 21 que a vazão só começa a cair quando a banda do *backbone* é inferior a 20 Mbps. Mais uma vez o protocolo TCP *Westwood* foi melhor, seguido do *New Reno*, *Reno* e *Tahoe*.

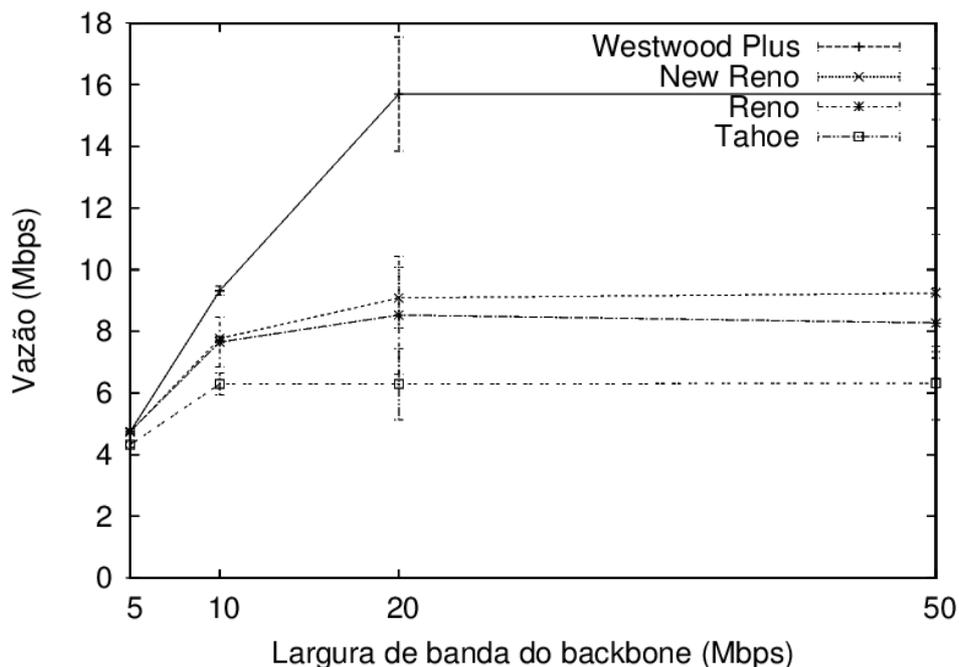


Figura 21 – Vazão x largura de banda no *Backbone*.

#### 3.5.4. Quarto Estudo: Janela de Congestionamento

No quarto estudo, analisamos a variação da janela de congestionamento dos protocolos TCP na presença de erros. Foi realizada uma única rodada de simulação com uma taxa fixa de erros de  $10^{-3}$ , introduzidos no canal entre o servidor (*Remote Host*) e a rede LTE, durante 60 s e com amostragem da janela de 1,5 s.

Os resultados são mostrados na Figura 22. Observa-se que o protocolo *Westwood Plus* apresenta a maior janela de congestionamento dentre os protocolos TCP *Reno*, *New Reno* e *Tahoe*. Isto ocorre porque o TCP *Westwood Plus* estima a banda de transmissão e na média apresenta a melhor vazão. Os protocolos TCP *New Reno* e *Reno* apresentam uma janela de transmissão bem semelhante, sendo a do *New Reno* um pouco maior. Já o TCP *Tahoe* apresenta o pior resultado, pois a janela de congestionamento volta sempre para o início da partida lenta com 1 segmento após uma perda de pacotes.

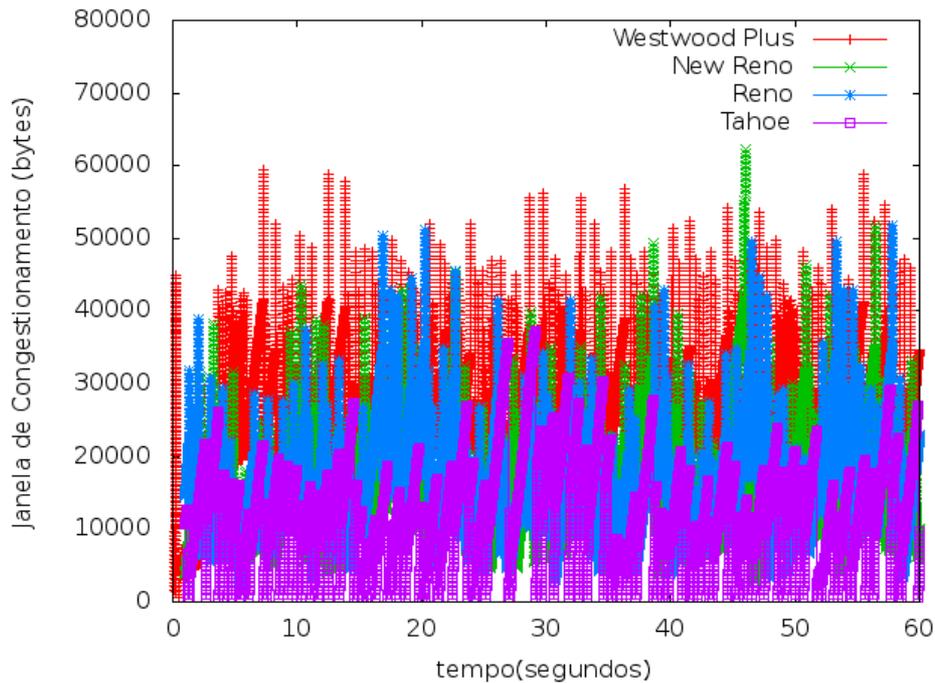


Figura 22 – Janela de congestionamento dos vários *flavours* TCP.

### 3.5.5. Quinto Estudo: Índice de Justiça

No quinto estudo, avaliamos a justiça no compartilhamento de banda numa topologia *butterfly*, onde cada cliente- $n$  é o conectado ao seu respectivo servidor- $n$ , conforme a Figura 23.

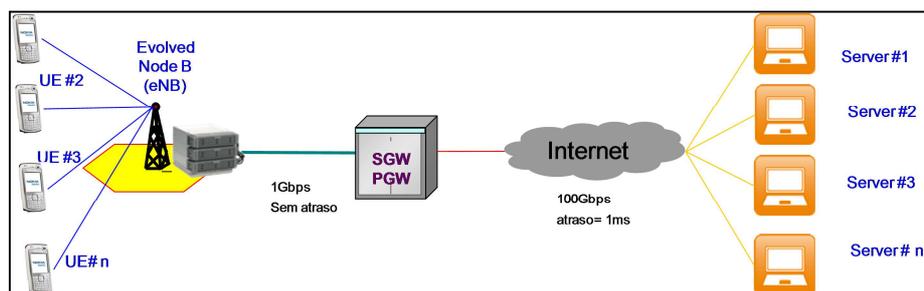


Figura 23 – Topologia *Butterfly* para simulação do índice de justiça.

Foi utilizado o índice proposto por Jain. Seu cálculo foi realizado através da Equação 6.

$$I_j = \frac{(\sum_f V_f)^2}{num\ fluxos * \sum_f (V_f)^2} \quad (6)$$

onde o *num fluxos* é o número de fluxos e  $V_f$  é a vazão do fluxo  $f$ . O índice de justiça é um critério utilizado em esquemas de alocação de recursos incluindo os sistemas de computadores distribuídos. A interpretação do índice de justiça é intuitiva. Por exemplo, com dois fluxos, se o índice de justiça é 1, o compartilhamento do canal é totalmente justo e se o índice 0,5, uma das estações conseguiu monopolizar o acesso ao meio.

Os resultados foram obtidos considerando cinco amostras de cada simulação e intervalos de confiança de 99% para média. O número de terminais variou de 2 a 4 (foram simulados outros valores de 6 e 8 usuários que não foram apresentados), com uma taxa de erro fixa de  $10^{-3}$  no canal *backbone*, entre o Servidor e o SGW/PGW.

Observamos nas Figuras 24 e 25 que o índice de justiça obtido confirmou que os protocolos TCPs estudados são considerados justos em relação à distribuição dos fluxos de dados com o aumento do número de usuários.

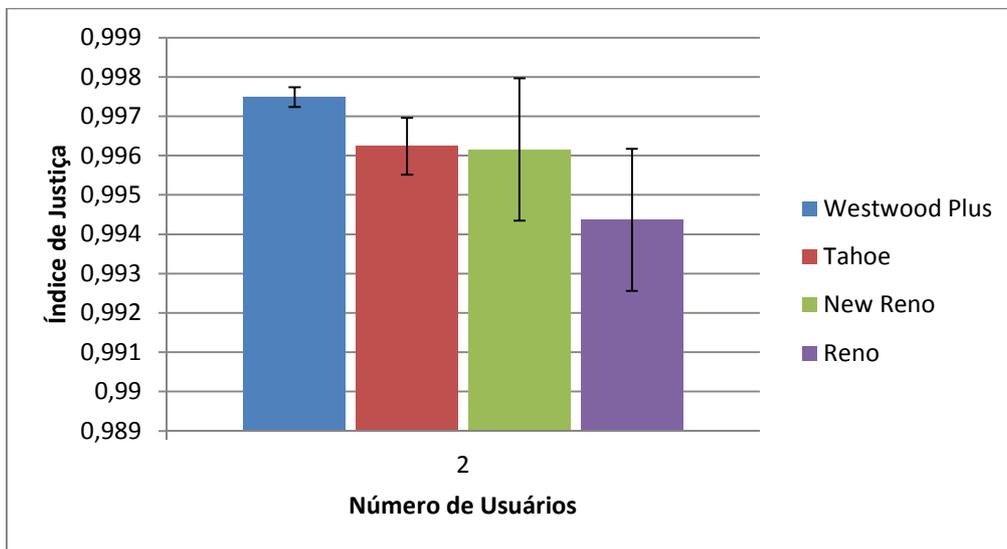


Figura 24 – Avaliação do índice de justiça para 2 usuários.

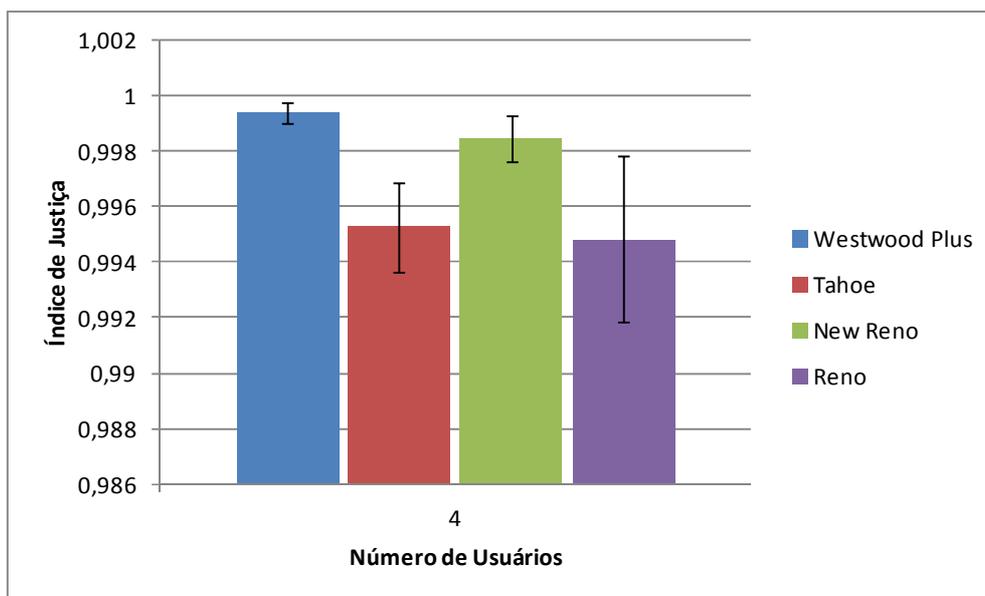


Figura 255 – Avaliação do índice de justiça para 4 usuários.

### 3.5.6. Sexto Estudo: RLC AM versus RLC UM

No sexto estudo, avaliamos o desempenho da vazão dos diferentes tipos de TCP (*Westwood Plus*, *Reno*, *New Reno*, *Tahoe*) num cenário mais real, habilitando os controles de erro nas camadas física e MAC, e variando o modo RLC com e sem reconhecimento.

Foi utilizado um cenário semelhante ao do primeiro estudo onde simulamos uma transferência de arquivos FTP no sentido *downlink* entre o Remote host e o Ue, com pacotes de 1500 bytes.

Diferente dos cenários anteriores, o erro foi introduzido na interface aérea de forma a podermos avaliar os comportamentos dos controles de erro e do modo RLC. O erro foi simulado através da atenuação do modelo de propagação Friss (padrão no NS-3) e do script de *fading* disponibilizado no NS-3 e processado no Matlab de acordo com os parâmetros de simulação (frequência de operação, número de RBs, velocidade de deslocamento, tempo e ambiente de simulação: pedestre, veicular ou urbano). O script de simulação chama o arquivo de *fading* processado no Matlab com os parâmetros escolhidos, faz variar a valor do SNIR (*Signal Noise Interference Ratio*), já atenuado pelo modelo de propagação, causando erros aleatórios na interface aérea. A distância  $d$  entre o Ue e a eNB foi de 500 ou 2000 m.

Foram realizadas algumas avaliações preliminares que mostraram que o modo RLC com ou sem reconhecimento possui impacto maior na vazão do que os controles de erro nas camadas físicas e MAC. Dessa forma, as simulações apresentadas a seguir deixam os controles de erro das camadas física e MAC ativados e variam somente o modo RLC. A Tabela 8 mostra os parâmetros adotados na simulação.

Tabela 8 – Parâmetros de simulação do sexto estudo.

Parâmetro	Valor
Modelo de propagação	Perda por atenuação em função da distância (Modelo Friss)
Largura de Banda para Uplink	5 MHz (ou RB=25)
Largura de Banda para Downlink	5 MHz (ou RB=25)
Configuração de Antenas	SISO
Modo RLC	RLC UM ou RLC AM
Controle de erro PHY	Ativado
Controle de erro dados	Ativado
Controle HARQ	Ativado
MAC Scheduler	Proportional Fair
Potência de Transmissão UE	24 dBm
Figura de Ruído UE	9 dB
Potência de Transmissão eNB	32 dBm
Figura de Ruído eNB	5 dB
TTI	1ms
MSS	1500 bytes
TCP	<i>Westwood Plus, Tahoe, New Reno, Reno</i>
Fading: ambiente de simulação	Veicular
Fading: Velocidade de deslocamento	60 Km/h
Tempo de simulação	60s

Os resultados foram obtidos considerando cinco amostras de cada simulação e intervalos de confiança de 99% para média, e são apresentados nas Figuras 26 e 27.

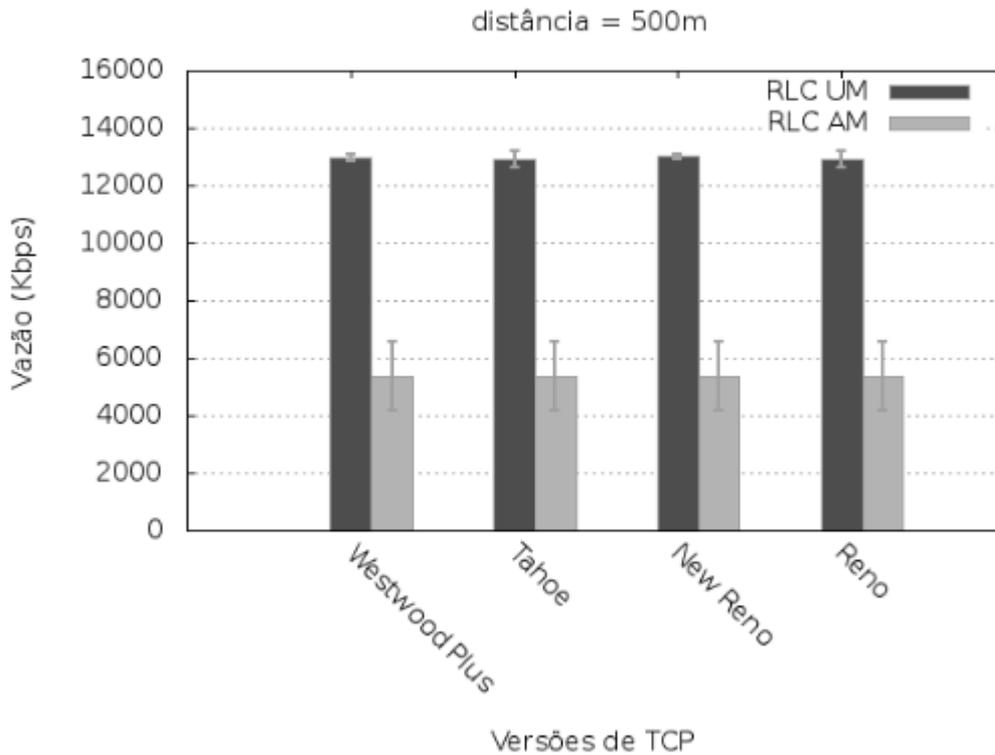


Figura 266 – Avaliação RLC AM versus RLC UM (d = 500 m).

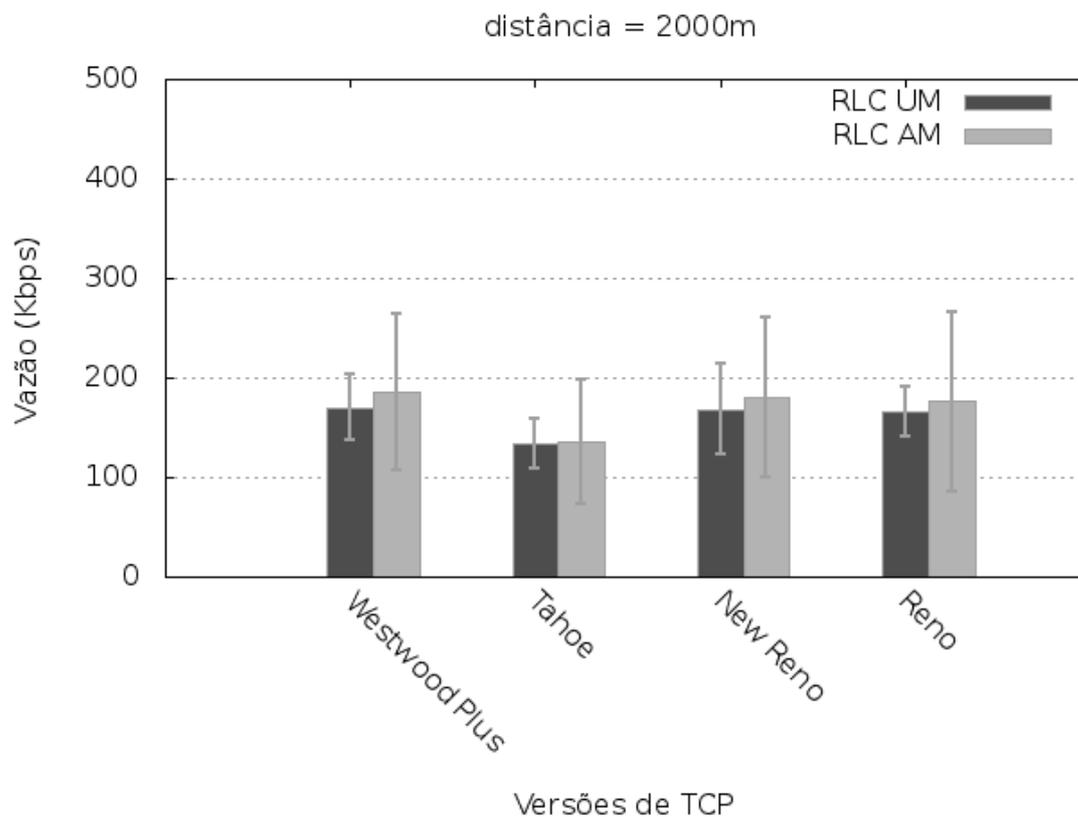


Figura 277 – Avaliação RLC AM versus RLC UM (d = 2000 m).

Podemos observar na Figura 25 que a uma distância de 500 m, uma menor vazão é obtida para o modo RLC com reconhecimento (RLC AM). Isso provavelmente se deve ao fato de que a essa distância, o efeito do *fading* introduzido não é pronunciado, fazendo com que o *overhead* do reconhecimento diminua consideravelmente a vazão. Há pouca variação na vazão em função do tipo de TCP utilizado.

Os resultados obtidos mostram que o modo RLC AM tem um comportamento melhor que o RLC UM a partir de uma distância de 2000 m (foram realizadas simulações com outros valores de distância que não foram apresentadas). O ganho em termos de vazão é pequeno, provavelmente em função dos erros gerados a partir da composição das atenuações dos sinais introduzidas pelo modelo de propagação e do desvanecimento (*fading*).

Novamente os protocolos TCP apresentaram resultados muito semelhantes, com um pequeno destaque para o TCP *Westwood Plus*.

De fato o modo RLC AM é o modo mais recomendado para transferência de arquivos onde a presença de ruído poderá afetar o desempenho do sistema.

## 4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho do protocolo TCP sobre uma rede LTE num ambiente fim-a-fim através de simulações.

Inicialmente foi avaliado o desempenho do TCP em quatro cenários, variando-se a taxa de erros no canal físico de transmissão, atraso e largura de banda do *canal backbone*, todos no sentido *downlink*.

Há partir da análise realizada, verifica-se que o protocolo TCP *Westwood Plus* teve um desempenho superior em relação aos outros protocolos testados (*New Reno*, *Reno* e *Tahoe*). A vazão e a janela de congestionamento foram sempre superiores no TCP *Westwood Plus* frente aos demais protocolos. Isto comprova a teoria do protocolo *Westwood Plus*, que estima a banda de transmissão com a taxa de ACKs recebidos, reduzindo de forma mais amena a janela de congestionamento na presença de erros.

Há de se notar do mesmo modo que os protocolos TCP *New Reno* e *Reno* apresentaram um desempenho semelhante nos cenários estudados. Isto é explicado porque a taxa de erros introduzida no canal do *backbone* tem uma distribuição uniforme, e a presença de erros duplos na mesma janela de transmissão tem uma probabilidade muito pequena. Assim o comportamento do *New Reno* passa a ser equivalente ao *Reno*.

O protocolo TCP *Tahoe* teve o pior desempenho de todos, uma vez que ele não possui o mecanismo de *fast recovery*, e com as perdas de pacotes, retorna sempre para o início da fase *slow-start* com a janela de congestionamento igual a 1.

O índice de justiça observado no quinto estudo confirmou que os protocolos TCPs estudados são considerados justos em relação à distribuição dos fluxos de dados com o aumento do número de usuários.

Por último, foi utilizado um novo cenário no qual o erro foi simulado na interface aérea através do modelo de propagação e de *fading*. O sexto estudo mostrou que o modo RLC AM (RLC com reconhecimento) é o mais apropriado para transferência de arquivos FTP à medida que diminui a relação SNIR e aumenta o erro na interface aérea. No caso de termos poucos erros na interface aérea, o modo RLC UM tem um melhor desempenho provavelmente em função do *overhead* dos reconhecimentos do RLC AM. Os protocolos TCPs tiveram desempenhos semelhantes no sexto estudo. De uma maneira geral, o pequeno melhor desempenho do RLC AM

para a maior distância avaliada pode ser explicado pelo erro aplicado na interface aérea, através do script de *fading* do NS3.

Desta forma, através destes testes pode-se concluir que o TCP *Westwood Plus* em conjunto com o modo RLC AM, são a melhor escolha em ambientes onde não temos congestionamento de rede, e as perdas de pacotes ocorrem por eventos inesperados como as da interface aérea das redes sem fio.

#### **4.1.1. Trabalhos Futuros**

É recomendável a extensão das simulações executadas com a inclusão de novos cenários com outros protocolos como o TCP SACK e TCP Vegas, ambos estão em desenvolvimento no NS-3.

É igualmente aconselhável a execução de experimentos práticos para verificação do desempenho do TCP e suas variantes na vida real. Novos cenários podem ser executados, como a inclusão de *handover*, e novas métricas podem ser obtidas para verificação do desempenho de determinadas aplicações como o VoIP.

## REFERÊNCIAS

1. ERICSSON. Relatório de Mobilidade Novembro 2013. Disponível em: <<http://www.ericsson.com/res/docs/2013/ericsson-mobility-report-november-2013.pdf>>. Acesso em: 20 Janeiro 2014.
2. 3GPP. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>>. Acesso em: 20 Janeiro 2014.
3. TOSKALA, A. Holma T. **LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access**. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
4. TOSKALA, A. Holma T. **LTE for UMTS: 3GPP Solution for IMT-Advanced**. John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
5. SANTOS, D. D. Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE. **Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2010.
6. ANRITSU. Future technologies and testing for Fixed Mobile Convergence, SAE and LTE in cellular mobile communications. **White Paper**, 2008.
7. RFC 3095 - ROHC (RObust Header Compression). Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc3095>>.
8. AL-SHAHRANI, A.; AL-OLYANI, H. LTE: Project EE-424, 2009. Disponível em: <<http://faculty.ksu.edu.sa/adelali/Student%20Presentations%20May%202008/LTE.pdf>>. Acesso em: Janeiro 2014.
9. TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. 5. ed. Pearson Prentice Hall, 2011.
10. Rezende, J. F., Costa, L. H. M. K., and Rubinstein, M. G. - "Avaliação Experimental e Simulação do Protocolo TCP em Redes de Alta Velocidade", in XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBRT 2005, pp. 53-58, Campinas, Brazil, September 2005.
11. KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet**. 5. ed. Pearson Education do Brasil, 2010.
12. MASCOLO, S. et al. **TCP Westwood**: Bandwidth estimation for enhanced transport over wireless link. MOBICOM, 2001. p. 287-297.
13. PETERSON, L. L.; DAVIE, B. S. **Redes de computadores: uma abordagem de sistemas**. 5. ed. Elsevier Editora Ltda, 2013.
14. OLIVEIRA, J. P. Análise de Desempenho de Rede TCP sobre GPRS num Ambiente fim a fim. **Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco**, Pernambuco, 2004.

15. MASCOLO, S. et al. Performance evaluation of Westwood + TCP congestion control. **Performance Evaluation**, Jan 2004.
16. BAKRE, A. et al. Implementation and performance evaluation of Indirect-TCP. **IEEE Transaction on Computers**, March 1997.
17. AL, H. B. E. A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over Wireless Links. **ACM SIGCOMM** , 1996.
18. YE T.; KAI; ANSARI, N. TCP in wireless environments: problems and solutions. **IEEE Communications Magazine**, v. 43, p. 27-32, 2005.
19. LENA EPC Network Simulator. Disponível em: <<http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/>>. Acesso em: Janeiro 2014.
20. GANGADHAR, A. et al. TCP Westwood Plus Protocol Implementation in ns-3. **Workshop in NS3 2013**, 2013.
21. AFANASYEV, A. et al. Host to Host Congestion Control for TCP. **IEEE Communication Surveys and Tutorials**.
22. KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores: Uma abordagem Top Down**. 5.ed. Pearson Education do Brasil, 2012.
23. BOAVIDA, F.; BERNARDES, M. **TCP/IP: Teoria e prática**. Lisboa: FCA - Editora de Informática, 2012.
24. HOLMA, H.; TOSKALA, A. **WCDMA for UMTS**. 3. ed. John Wiley & Sons, LTD, 2004.
25. **Documentação do NS-3 online**. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/release/3.17/doxygen/index.html>>. Acesso em: Janeiro 2014.