

Análise Histórica e Funcional das Redes 4G LTE

Victor de Souza Mazzoni

JUIZ DE FORA

JULHO, 2014

Análise Histórica e Funcional das Redes 4G LTE

VICTOR DE SOUZA MAZZONI

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Luciano Jerez Chaves

JUIZ DE FORA
JULHO, 2014

Análise Histórica e Funcional das Redes 4G LTE

VICTOR DE SOUZA MAZZONI

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO.

Aprovada por:

Luciano Jerez Chaves
Mestre em Ciência da Computação

Alex Borges Vieira
Doutor em Ciência da Computação

Francisco Henrique Cerdeira Ferreira
Mestre em Ciência da Computação

JUIZ DE FORA
JULHO, 2014

Resumo

No contexto traçado desde o início da comunicação analógica em celulares na década de 1980 até o momento atual com conteúdo digital em alta velocidade nos dispositivos móveis, o presente trabalho fará uma abordagem geral da história e evolução da comunicação sem fio, seguida de uma especificação mais detalhada dos sistemas de telecomunicação modernos, com enfoque na tecnologia Long Term Evolution (LTE) da quarta geração de telefonia celular (4G). Este trabalho aprofunda o conhecimento nessa tecnologia e avalia o seu desempenho através de simulações computacionais, obtendo resultados satisfatórios e otimistas quanto ao desempenho alcançado.

Palavras-chave: Sistemas de comunicação sem fio, Telefonia celular, Telefonia celular de quarta geração (4G), Redes Long Term Evolution (LTE).

Sumário

Resumo.....	1
1 Introdução	3
2 Histórico e evolução da comunicação sem fio	5
3 Telefonia celular nas gerações 3G e 4G	14
3.1 Tecnologias da geração 3G.....	15
3.2 Tecnologias da geração 4G.....	16
3.2.1 A tecnologia WiMax	16
4 O padrão Long Term Evolution (LTE)	20
4.1 Arquitetura.....	23
4.2 Interface sem fio	24
4.3 Múltiplas antenas	25
4.4 Qualidade de Serviço.....	29
4.5 Flexibilidade de espectro	32
5 Simulações e Resultados.....	38
5.1 O simulador de redes ns3.....	38
5.1.1 O módulo LTE.....	38
5.1.2 Dispositivos LTE.....	40
5.1.3 Escopo e limitações	41
5.2 Simulações LTE.....	41
5.3 Análise dos resultados	47
6 Conclusão	50
Referências bibliográficas	51
Apêndice A – Cenário de simulação.....	53

1 Introdução

Devido à necessidade do acesso às informações de forma rápida e instantânea, e também às facilidades que se apresentam com o surgimento de novas tecnologias, um dos temas mais discutidos e falados no mundo tecnológico é a telefonia celular.

A história da telefonia celular é recente e, conforme a evolução foi acontecendo, novos serviços foram surgindo e utilizando-se das tecnologias disponíveis. Na primeira geração da telefonia celular, ainda na década de 1980, o sinal utilizado nas transmissões sem fio era analógico e, apesar de permitir transmissões na velocidade similar à conexão discada, essa primeira geração mal chegou a ser utilizada para trafegar dados, pois logo na década de 1990 começou a ser implantado a tecnologia de segunda geração (2G), que utiliza o sinal digital Global System for Mobile Communications (GSM). O GSM foi estabelecido como o principal recurso de conversação, por oferecer todas as ferramentas necessárias para as operadoras. Para o uso de Internet móvel, no entanto, já estava bastante defasado. Para o tráfego de dados foi implantado o que ficou conhecido como 2,5G, que serviu como padrão de transição para a tecnologia 3G. A geração 2,5G utiliza as tecnologias General Packet Radio Service (GPRS) e Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), que oferecem velocidades maiores para transmissão de dados. Já a tecnologia 3G, começou a ser desenvolvida em 1992 mas foi utilizada pela primeira vez apenas em 2001. As redes 3G utilizam as tecnologias Wide-Band Code-Division Multiple Access (WCDMA) ou Code Division Multiple Access (CDMA). O WCDMA inclui as tecnologias High Speed Packet Access (HSPA) e a evolução HSPA+, também comercializado no Brasil sob as alcunhas de 3G e 3G+, respectivamente. Estas tecnologias preveem velocidades estas muito superiores às alcançadas pelas redes anteriores. Por fim surgiu a tecnologia 4G, que oferece desempenho e

velocidades mais estáveis para os consumidores em comparação com a tecnologia anterior. As redes 4G conseguem alcançar velocidades que representam a verdadeira banda larga móvel: algo entre 50 e 100 Mbps, e utilizam-se principalmente da tecnologia Long Term Evolution (LTE), que pode ser traduzida como Evolução a Longo Prazo. A LTE é uma tecnologia móvel de transmissão de dados que foi criada com base no GSM e WCDMA, com a diferença que dessa vez a tecnologia prioriza o tráfego de dados ao invés do tráfego de voz. Com isso, o 4G proporciona uma rede de dados mais rápida e estável.

Neste contexto, o presente trabalho fará uma abordagem geral da história e evolução da comunicação sem fio, seguida de uma especificação maior do objetivo do estudo: o sistema conhecido como LTE. Além de dados históricos e informações técnicas, também ficam a disposição neste trabalho os resultados de simulações obtidos em um cenário simples para avaliar a taxa de transferência alcançada pela tecnologia. Os resultados foram obtidos através do uso do simulador de redes ns3, e demonstram a eficiência da rede em questão.

O documento foi dividido em quatro capítulos que, por sua vez, foram divididos em subseções pertinentes aos assuntos abordados. O Capítulo 2 apresenta um histórico da comunicação sem fio desde seus primórdios até o final da segunda geração (2G). No Capítulo 3 encontra-se uma análise das tecnologias que receberam o nome de terceira e quarta geração (3G e 4G). Já o Capítulo 4 trata da especificação sobre os elementos e as técnicas utilizadas no objeto do estudo deste trabalho: a tecnologia LTE de quarta geração. No Capítulo 5 é possível observar o cenário utilizado para as simulações e os resultados obtidos, acompanhado de gráficos de desempenho. Para finalizar, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

2 Histórico e evolução da comunicação sem fio

Para uma melhor compreensão dos sistemas de comunicação sem fio atuais, um breve histórico desse tipo de comunicação é apresentado neste capítulo. Não é tido como objetivo que se mencione todas as invenções, mas sim os destaques que contribuíram fundamentalmente para os sistemas atuais.

O uso da luz para comunicações sem fio remete aos tempos antigos. Em outros tempos, a luz era “modulada” usando espelhos para criar um certo padrão de ligado/desligado ou, por exemplo, bandeiras foram usadas para sinalizar palavras de código. O uso de sinais de fumaça para a comunicação é mencionado em 150 a.C. Também é relatado desde o início da Dinastia Han, na China antiga (206 a.C. – 24 d.C.), que a luz foi utilizada para mensagens de sinalização ao longo de uma linha de torres de sinal para a capital Chang'na (Xi'an). Usar luz e bandeiras para comunicação sem fio permaneceu importante para a marinha até que a comunicação por rádio foi introduzida, mas até hoje um marinheiro tem que saber alguns códigos representados pelas bandeiras, para o caso de todos os outros meios de comunicação sem fio falharem. Porém, antes das tecnologias utilizadas para comunicação de voz e dados atuais serem apresentadas, é necessário um breve histórico sobre a evolução da comunicação com fio.

A comunicação com fio começou com a primeira linha de telégrafo comercial entre Washington e Baltimore em 1843, e da invenção e comercialização do telefone em 1876, por Alexander Graham Bell. Alguns anos depois (1981), em Berlim, um serviço de telefone público estava disponível, e o primeiro serviço público regular de voz e vídeo foi estabelecido em 1936, entre as cidades de Berlim e Leipzig.

Todos os sistemas de transmissão ótica sofrem com a alta frequência da luz

transportadora. Pequenas sombras que servem como obstáculo para o sinal, chuva e neblina tornam a comunicação quase impossível. Naquela época não era possível concentrar a luz de forma tão eficiente como pode ser feito hoje por meio de um laser, e a comunicação sem fios realmente não teve utilização significativa até a descoberta das ondas eletromagnéticas e do desenvolvimento dos equipamentos moduladores. Tudo começou com Michael Faraday (e quase ao mesmo tempo com Joseph Henry), demonstrando a indução eletromagnética, em 1831. James C. Maxwell fundamentou as teorias dos campos eletromagnéticos por volta de 1864, e essas foram comprovadas por Heinrich Hertz em 1886. Posteriormente, Nikola Tesla descobriu técnicas necessárias para aumentar a distância das transmissões eletromagnéticas.

O nome que está mais intimamente ligado ao sucesso da comunicação sem fio é certamente o de Guglielmo Marconi (1874 – 1937). Ele fez a primeira demonstração do telégrafo sem fio em 1895, utilizando a transmissão de ondas longas com potência de transmissão muito alta. A primeira transmissão transatlântica deu-se em 1901. Apenas seis anos depois, em 1907, as primeiras ligações transatlânticas comerciais foram criadas. Estações que utilizam trinta antenas de 100 metros de altura foram necessárias em ambos os lados do Oceano Atlântico para conseguir uma comunicação com sucesso. Naquela época, ocorreu a primeira conferência mundial de administração de rádio, coordenando o uso mundial de frequências de rádio. A primeira transmissão de rádio aconteceu em 1906, quando Reginald A. Fessenden transmitiu voz e música para o natal. Em 1915, a primeira transmissão de voz sem fio aconteceu entre as cidades de Nova York e San Francisco. A primeira estação de rádio comercial entrou em funcionamento no ano de 1920, e o emissor e o receptor ainda precisavam de enormes antenas e potência de transmissão alta para alcançar os receptores.

Toda esta prática mudou fundamentalmente com a descoberta das ondas curtas por Marconi, em 1920. A vantagem das ondas curtas em relação às outras ondas é de que estas podem ser refletidas na ionosfera. Era então possível enviar ondas curtas de rádio a todo o

mundo utilizando a ionosfera – técnica usada ainda hoje. A invenção do tubo de vácuo eletrônico em 1906, por Lee DeForest e Robert von Lieben, também ajudou a reduzir o tamanho do emissor e do receptor. Os tubos de vácuo ainda são utilizados, por exemplo, para a amplificação do sinal de saída de emissoras de rádio. Um dos primeiros transmissores “móveis” estava a bordo de um Zeppelin em 1911. Já em 1926, o primeiro telefone em um trem estava disponível na linha entre as cidades de Berlim e Hamburgo, na Alemanha. Fios paralelos à ferrovia funcionavam como antena. A primeira rádio de carro estava disponível comercialmente em 1927 (Philco Transitone). No início da década de 1930, muitas emissoras de rádio já estavam transmitindo seus programas para todo o mundo.

O ano de 1928 foi de muitos ensaios de campo para a radiodifusão televisiva. John L. Baird (1888 – 1946) transmitiu TV através do Atlântico e demonstrou a TV a cores, enquanto a estação WGY começou as transmissões de TV regulares e os primeiros noticiários. A primeira teleaula aconteceu em 1932, a partir da estação CBS W2XAB. Até então, toda a comunicação sem fio usava modulação de amplitude, que oferecia qualidade relativamente ruim, devido à interferência de sinais. Um grande passo nesse sentido foi a utilização da modulação de frequência em 1933, por Edwin H. Armstrong. Ambos os esquemas de modulação ainda são usados para transmissão de rádio hoje em dia, com a modulação de frequência resultando em uma qualidade muito melhor.

Após a Segunda Guerra Mundial, muitos projetos nacionais e internacionais na área das comunicações sem fio foram desencadeados. A primeira rede analógica construída na Alemanha foi a A-Netz, em 1958. Em 1971, este sistema teve uma cobertura de 80% e 11 mil clientes, seguida de sua sucessora, a B-Netz, que alcançou 13 mil clientes.

Ao mesmo tempo, os países do norte da Europa, como Dinamarca, Finlândia, Noruega e Suécia (o berço das comunicações móveis modernas) instituíram o sistema de telefonia móvel nórdica (NMT). O NMT analógico usava uma portadora de 450 MHz e ainda é o único

sistema disponível para a comunicação móvel em alguns lugares muito remotos. Várias outras normas nacionais evoluíram e, no início da década de 1980, a Europa teve mais do que um punhado de diferentes padrões de telefonia móvel analógicas completamente incompatíveis. De acordo com a ideia geral de uma União Europeia, os países europeus decidiram desenvolver um padrão pan-europeu de telefonia móvel em 1982. O novo sistema teve como objetivos usar um novo espectro em 900 MHz, permitir roaming de usuários em toda a Europa, ser totalmente digital e oferecer serviços de voz e dados. O “Groupe Spécial Mobile” Global System for Mobile Communications (GSM) foi fundado para este novo desenvolvimento.

Em 1983, foi criado o sistema de telefonia dos EUA: o Advanced Mobile Phone System (AMPS). O AMPS é um sistema de telefonia móvel analógica trabalhando na frequência de 850 MHz. Telefones sem fio residenciais utilizavam o padrão Cordless Telephone 1 (CT1) em 1984. Como os sistemas digitais ainda não estavam disponíveis, mais normas analógicas se seguiram, como o alemão C-Netz na faixa de 450 MHz para a transmissão de voz analógica. A comunicação entre “células” tornou-se possível, pois o sistema de sinalização digital foi implementado de acordo com as tendências em redes fixa e a localização automática de um usuário móvel em toda a rede tornou-se factível. A rede AMPS analógica foi desligada em 2000. Além da transmissão de voz, os serviços oferecidos eram fax, transmissão de dados via modem, X.25, e correio eletrônico. O CT2, o sucessor de CT1, foi incorporado aos padrões britânicos publicados em 1987 e mais tarde adotado pelo European Telecommunications Standards Institute (ETSI) para a Europa. O CT2 utilizava o espectro de 864 MHz e apresentava um canal de dados com velocidade de 32 kbps.

O início da década de 1990 foi marcado pela introdução dos sistemas totalmente digitais. Em 1991, a ETSI adotou o padrão europeu para telefone sem fio digital Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT). O DECT funciona num espectro de 1880 à

1900 MHz, com um alcance de 100 à 500 metros. Com 120 canais duplex, pode-se implementar roaming, isso significa uma transferência sem descontinuidades em um telefonema de uma operadora para outra além das fronteiras nacionais e até 1,2 Mbps para transmissão de dados. Vários novos recursos, como criptografia e autenticação de voz, são nativos. O sistema suporta até 10.000 usuários/km² e é utilizado em mais de 110 países ao redor do mundo (mais de 150 milhões de unidades vendidas).

Finalmente, depois de muitos anos de discussões e ensaios de campo, o GSM foi padronizado em 1991. Esta primeira versão do GSM trabalha a 900 MHz e utiliza 124 canais full-duplex. O GSM oferece roaming internacional, serviços de localização automática, autenticação, criptografia na conexão sem fio, interoperação eficiente com sistemas Integrated Services for Digital Network (ISDN), e uma qualidade de áudio relativamente alta. Além disso, o Short Message Service (SMS) para mensagens curtas de até 160 caracteres, fax grupo 3, e os serviços de dados em 9,6 Kbps foram integrados. Dependendo dos regulamentos nacionais, um ou vários provedores podem utilizar os canais, diferentes contas e sistemas de cobrança podem ser aplicados, etc. No entanto, todos os sistemas GSM permanecem compatíveis. Até agora, mais de 400 provedores em mais de 190 países adotaram o padrão GSM (mais de 70% do mercado de telefonia móvel do mundo).

Logo se descobriu que a rede analógica AMPS nos EUA e a rede digital GSM em 900 MHz na Europa não eram suficientes para as altas densidades de usuários das cidades. Quanto aos EUA nenhum novo espectro foi alocado para um novo sistema. Já na Europa, uma nova faixa de frequência de 1800 MHz foi escolhida. Nos EUA, diversas empresas desenvolveram diferentes tecnologias novas e mais eficientes em termos de largura de banda para operar lado a lado com o AMPS na mesma faixa de frequência. Isto resultou em três sistemas incompatíveis: os amplificadores de banda estreita analógicos, e os dois sistemas digitais Time Division Multiple Access (TDMA) e Code Division Multiple Access (CDMA). Os

européus concordaram em usar GSM no espectro de 1800 MHz. Estas redes GSM-1800 começaram com uma melhor qualidade de voz devido a novos codecs de voz. Estas redes consistem em mais antenas para cobrir células menores. O GSM também está disponível nos EUA como GSM-1900, utilizando espectro em 1900 MHz, como as versões mais recentes dos sistemas de TDMA e CDMA.

A Europa acredita em padrões, enquanto os EUA acreditam em forças de mercado. O GSM é um dos poucos exemplos em que a abordagem via padronização funcionou. Assim, enquanto a Europa tem um padrão comum e o roaming é possível, mesmo para a Austrália e Singapura, os EUA ainda lutam com muitos sistemas incompatíveis. No entanto, o quadro é diferente quando se trata de sistemas mais orientados a comunicação de dados, como redes de área local. Muitos sistemas de redes locais sem fio já existiam quando ETSI padronizou as redes High Performance Radio LAN (HIPERLAN) em 1996. Esta era uma família de padrões e recomendações. HIPERLAN tipo 1 opera em 5,2 GHz e oferece taxas de dados de até 23,5 Mbps. Outros tipos foram especificadas como o tipo 4 que vai até 155 Mbps em 17 GHz. No entanto, apesar de vir mais tarde (1997) do que a HIPERLAN, o padrão IEEE 802.11 foi logo o vencedor para redes locais sem fio. Ele trabalha com licença livre na Indústria, Ciência e Medicina (ISM) na faixa de 2,4 GHz e infravermelho, oferecendo 2 Mbps no início (até 10 Mbps com soluções proprietárias já naquela época). Embora a HIPERLAN tenha melhores números de desempenho, nenhum produto estava disponível enquanto muitas empresas logo ofereceram equipamentos compatíveis com o IEEE 802.11.

O ano de 1998 marcou o início de uma comunicação móvel usando satélites com o sistema Iridium. Até este momento, os satélites basicamente trabalhavam como um meio de distribuição das transmissões ou só podiam ser utilizados com equipamentos grandes e pesados. O Iridium marcou o início de pequenos e verdadeiramente telefones portáteis via satélite, incluindo serviço de dados. O Iridium consiste de 66 satélites na órbita baixa da Terra

e usa a banda de 1,6 GHz para comunicação com o telefone celular. Em 1998, os europeus concordaram com o Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), como a proposta europeia para a União Internacional de Telecomunicações (UIT) IMT-2000. Na primeira fase, UMTS combina a tecnologia de rede GSM com soluções mais eficientes em termos de largura de banda da CDMA.

As recomendações IMT-2000 definiram um framework comum em todo o mundo para o futuro das comunicações móveis a 2 GHz. Isso inclui, por exemplo, um framework de serviços, uma arquitetura de rede, incluindo a comunicação por satélite, estratégias para os países em desenvolvimento, os requisitos da interface de rádio, as considerações do espectro, estruturas de segurança e de gestão, e diferentes tecnologias de transmissão. Os padrões definidos até o presente momento na história ficaram conhecidos como partes da primeira e segunda geração da comunicação sem fio.

Já em 1999 novos padrões de redes locais sem fio mais potentes foram apresentados. O IEEE 802.11b publicado oferecendo 11 Mbps em 2,4 GHz. O mesmo espectro foi utilizado por Bluetooth, uma tecnologia de curto alcance para configurar redes pessoais sem fio com taxas de dados brutos menores que 1 Mbps. A ITU deixou cair o plano de um padrão único, em todo o mundo para sistemas de telefonia móvel da terceira geração e decidiu sobre o conceito de família IMT-2000, que inclui várias tecnologias (UMTS, CDMA2000, DECT, etc.).

O ano 2000 veio com maiores taxas de dados e transmissão de pacotes orientada para GSM: o High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD), e o General Packet Radio Service (GPRS). Não deve ser esquecido que o final dos anos noventa foi o momento em que várias especulações sobre o negócio das comunicações começou. Assim, foi relativamente fácil para o pessoal de marketing retratar a tecnologia de terceira geração, como Internet de alto desempenho em telefones móveis. Na Europa, o UMTS foi anunciado como capaz de

manipular streaming de vídeo interativos ao vivo para todos os usuários a 2 Mbps. Todas as pessoas tecnicamente orientadas sabiam que essa promessa não poderia ser cumprida pelo sistema, mas os leilões e concursos para licenciamento do espectro 3G começaram. Só na Europa, mais de € 100 bilhões tinham sido pagos antes da desilusão acontecer. Empresas que nunca haviam manipulado uma rede antes pagaram bilhões pelas licenças. Muitas dessas empresas faliram e as restantes sofrem com as dívidas.

A maior parte da especulação havia acabado, mas a terceira geração de comunicação móvel começava em 2001: no Japão com o serviço Freedom of Mobile Multimedia Access (FOMA), na Europa com vários ensaios de campo, e na Coreia com CDMA2000. O IEEE lançou um novo padrão de redes locais, o 802.11a operando em 5 GHz e oferecendo taxas de 54 Mbps de dados brutos. Esse padrão utiliza a mesma camada física como a HIPERLAN2 (padronizada em 2000), o único membro restante da família HIPERLAN. Em 2002, novos desenvolvimentos em redes locais sem fio se seguiram. Exemplos são 802.11g, oferecendo até 54 Mbps a 2,4 GHz e muitas novas aplicações Bluetooth (headsets, controles remotos, teclados sem fio, etc.) Os provedores de rede continuaram a implantar a infraestrutura para redes 3G, como muitas condições de licenciamento previam uma cobertura mínima em uma determinada data. Enquanto a TV digital via satélite já existia há vários anos, a Digital Video Broadcasting – Terrestrial (DVB-T) começou como serviço regular em Berlim, em novembro de 2002. Este sistema permite a TV de alta qualidade e requer apenas uma antena de alguns centímetros.

A Figura 2.1 apresenta uma visão geral de algumas das redes descritas acima, e mostra o desenvolvimento de sistemas de telefonia celular e telefones sem fio, juntamente com satélites e redes locais. Embora muitos dos sistemas de telefonia móvel clássicos tenham convergido para sistemas IMT-2000 (com CDMA2000), a área de WLANs foi desenvolvida independente, de certa forma. [1].

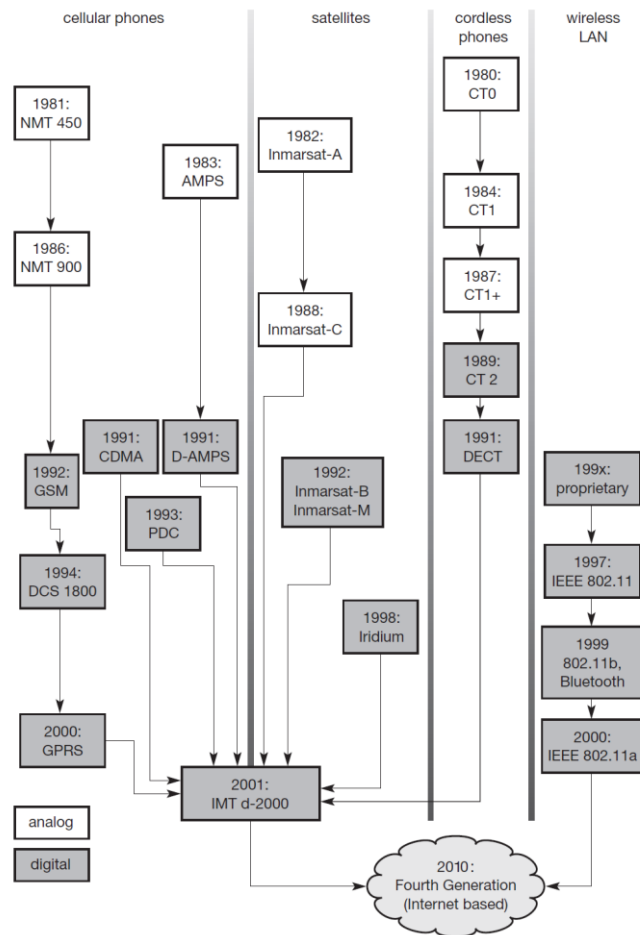


Figura 2.1: Evolução dos sistemas de comunicação sem fio [2].

Tendo em vista esse histórico, serão exploradas nos próximos capítulos as especificações e a evolução das tecnologias da terceira geração da comunicação sem fio, bem como a ascensão da mesma até a quarta geração.

3 Telefonia celular nas gerações 3G e 4G

O termo 3G significa terceira geração, e é destinado aos verdadeiros telefones celulares multimídia, normalmente chamados smartphones, que apresentam maior largura de banda e maiores taxas de transferência. As redes 3G têm velocidades de transferência potencial de até 3 Mbps (cerca de 15 segundos para baixar uma música MP3 de 3 minutos em velocidade máxima constante). Para efeito de comparação, os mais rápidos telefones 2G podem atingir até 144 Kbps (cerca de 8 minutos para baixar a mesma música nas mesmas condições). As altas taxas de dados de 3G são ideais para download de informações da Internet e envio e recebimento de arquivos e tráfego multimídia. Os telefones 3G são como “mini-laptops” e podem acomodar aplicações de banda larga, como videoconferências, recebimento de streaming de vídeo a partir da Web, além do envio e recebimento de mensagens com conteúdo multimídia.

Além das taxas de transferência maiores, as redes 3G têm a vantagem de estar disponível em movimento (algo que não acontece com o Wi-Fi, que é limitado a poucos metros em torno do roteador emissor). Assim, um usuário com um telefone 3G com um bom plano de dados está apto a fazer chamadas grátis para celular: ele só terá que baixar o aplicativo apropriado e instalar em seu celular para começar a realizar chamadas. Tudo isso utilizando os protocolos TCP/IP.

Uma métrica de qualidade muito importante em redes sem fio é a latência da rede, que é basicamente uma medida do tempo que leva para que um pacote viaje a partir de um nó origem à um nó destino. A latência tem um impacto direto sobre o desempenho do TCP. Portanto, um objetivo importante dos projetos das gerações 3G e 4G tem sido o de reduzir a latência de rede para aumentar a qualidade do serviço de dados. Outro critério relacionado

com a qualidade (do ponto de vista do usuário final) se relaciona com o tempo de configuração para iniciar, por exemplo, uma sessão de navegação na web [3].

Já no aspecto de engenharia de tráfego, os recursos de rádio precisam ser compartilhados quando vários usuários estão na rede. Como consequência, todos os dados devem ser colocados em filas antes de serem transmitidos, o que restringe a eficácia da taxa de dados para cada usuário. Para contornar este problema as redes 3G e 4G contam o escalonamento de recursos de rádio, onde os operadores podem melhorar o rendimento do sistema ou o número total de bits por segundo transmitido através da interface de rádio. Em relação às tecnologias 3G e 4G, tanto o HSPA quanto o LTE empregam métodos de escalonamento inteligentes para otimizar o desempenho (dos pontos de vista do usuário final e do operador).

Uma medida comum de desempenho do sistema 3G é “a eficiência do espectro”, que é a taxa de transferência do sistema por MHz de espectro em cada setor do sistema. Outra medida importante para os operadores é o número de usuários ativos que podem se ligar simultaneamente. Dado que os recursos do sistema são limitados, não haverá um equilíbrio entre o número de usuários ativos e qualidade percebida do serviço em termos de taxa de transferência de usuário.

3.1 Tecnologias da geração 3G

Existem muitas tecnologias que compõem a terceira geração de telefonia celular, como o WCDMA, GSM EDGE, UMTS, DECT e CDMA2000. O GSM EDGE, por exemplo, permite a transferência de dados mais rápida do que GSM. O EDGE foi introduzido pela AT&T em 2003 e aumentou a cobertura GSM até três vezes mais. Além disso, também é uma tecnologia 3G, portanto ele pode ser usado por sistemas de comutação de pacotes.

Já o UMTS está em conformidade com o padrão ITU IMT2000. É uma rede mais

complexa e permite a cobertura de acesso de rádio, rede básica e o Universal Subscriber Identity Module (USIM). É uma tecnologia relativamente cara para os operadores de rede, porque requer infraestrutura nova e separada para a sua cobertura. O GSM e o GSM EDGE são as bases desta tecnologia.

O CDMA é similar ao GSM porque também é compatível com versões anteriores. Já o DECT foi desenvolvido na Europa, e é muito popular em outros países do mundo também. Ele é executado na frequência de 1900 MHz.

3.2 Tecnologias da geração 4G

3.2.1 A tecnologia WiMax

Dentre os padrões 4G existe o Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax). Ele transmite uma variedade de sinais sem fio e pode ser operado no modo de ponto e multiponto. Foi desenvolvido em 2001 pelo WiMax Forum. Esta tecnologia elimina a necessidade de fios e é capaz de fornecer 10 Mbps. O WiMax é semelhante ao Wi-Fi com a exceção de que oferece acesso de alta velocidade, banda larga numa área muito mais ampla e com muito menos interferência. Dessa forma, os dispositivos habilitados para o serviço WiMax podem acessar a Internet em quase qualquer lugar dentro da grande área de cobertura e em locais onde não há pontos de conexão Wi-Fi disponíveis.

Um sistema WiMax é composto por duas partes:

- Uma torre WiMax, parecida em seu conceito com a torre de telefonia celular, que pode fornecer cobertura para uma área muito grande (8 mil km²);
- Um receptor WiMax, normalmente ligado ao computador cliente.

Uma torre WiMax pode se conectar diretamente à Internet usando uma conexão com fio de alta largura de banda. Pode também se conectar a outra torre WiMax usando um link de

micro-ondas em linha de visão. Esta conexão a uma segunda torre (geralmente chamada de backhaul), junto com a capacidade de uma única torre de cobrir até 8 mil km², é o que permite ao WiMax fornecer cobertura a áreas rurais remotas. A Figura 3.1 ilustra o funcionamento de uma conexão WiMax.



Figura 3.1: Funcionamento de uma conexão WiMax [4].

O WiMax pode fornecer dois tipos de serviço sem fio. O primeiro é o serviço sem linha de visão, parecido com o Wi-Fi, no qual uma pequena antena no seu computador se conecta à torre. Neste caso, o WiMax usa uma frequência de baixo e médio alcance (2 GHz a 11 GHz, semelhante ao Wi-Fi). As transmissões por ondas de baixa frequência não são interrompidas com tanta facilidade por obstruções físicas, já que elas são capazes de difratar mais facilmente, ou se curvarem aos obstáculos.

O outro serviço é o de linha de visão, no qual uma antena fixa aponta para a torre WiMax a partir de um telhado ou de um poste. A conexão de linha de visão é mais forte e mais estável, e consegue enviar muitos dados com poucos erros. As transmissões de linha de

visão usam frequências mais altas, de até 66 GHz. Em altas frequências, há menos interferência e muito mais largura de banda.

O acesso parecido com o Wi-Fi é limitado a um raio de poucos quilômetros (talvez uma cobertura de 65 Km², parecida, em termos de alcance, com uma área de cobertura de telefonia celular). Através das antenas de linha de visão, a estação transmissora de WiMax envia dados a computadores habilitados para o WiMax ou para roteadores configurados dentro do raio de cobertura [4].

O WiMax oferece velocidades de acesso à Internet semelhantes às conexões Digital Subscriber Line (DSL) e cabo, diretamente a um dispositivo habilitado com WiMAX. Entretanto, o WiMax não deve substituir o Wi-Fi, mas sim preencher as lacunas entre pontos de conexão e estender o acesso à Internet a qualquer lugar. O WiMax serve os usuários móveis com uma gama mais ampla de cobertura sem fio. Suas conexões de alta velocidade fornecem acesso a conteúdo de mídia mais complexos e experiências de jogos mais interessantes. Além disso, essa tecnologia fornece conectividade de banda larga em uma quantidade maior, mesmo quando o usuário está em trânsito.

A conectividade WiMax exige um dispositivo habilitado para essa tecnologia e a aquisição de serviços de banda larga WiMax de um provedor. A conectividade pode exigir a aquisição de software ou hardware adicionais a um custo extra. A disponibilidade ainda é limitada e o desempenho real da banda larga pode variar dependendo de fatores ambientais e outras variáveis [5].

Mas nem tudo relacionado ao WiMax está claro. Os impulsionadores da tecnologia WiMax (Intel, Nokia, NEC e Alcatel) não chegaram a um acordo sobre as especificações de um padrão que permita certificar os equipamentos, o que fez por atrasar a adoção da tecnologia. A primeira versão do WiMax, pensada para distribuir Internet sem fio de banda larga, foi aprovada em 2004, mas as provas de certificação e interoperabilidade entre

equipamentos ficaram atrasadas até 2006. Por isso, os primeiros produtos comerciais certificados só foram lançados dois anos após a aprovação [6].

4 O padrão Long Term Evolution (LTE)

Seguindo nos padrões 4G mais relevantes, existe também o Long Term Evolution (LTE), em português “Evolução de Longo Prazo”. Este é um padrão de redes de comunicação móveis que se encontra em fase de adaptação por parte dos operadores que utilizam tecnologias GSM como WCDMA e HSPA, e também pelos operadores de CDMA. Esta nova tecnologia de rádio permite velocidades de 150 Mbps de downlink e 50 Mbps de uplink (taxas máximas) [7].

O LTE foi concebido para manter a compatibilidade com o GSM e o HSPA. Incorpora o Multiple Input Multiple Out (MIMO), em combinação com o Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) no downlink e Single Carrier – Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) no uplink para conseguir utilizações eficientes do espectro eletromagnético. Ele pode ser utilizado em blocos de frequências de 1,4 MHz a 20 MHz com multiplexação no tempo ou na frequência.

Apesar de tanto o LTE como o WiMax utilizarem ambos o OFDMA, o primeiro possui a vantagem de ser compatível com os recursos existentes nas redes HSPA e GSM, permitindo que os operadores móveis possam realizar a transição para a tecnologia LTE sem descontinuidade de serviço nas redes já existentes. Vários dos grandes operadores de comunicações móveis, incluindo alguns que utilizam a norma CDMA, optaram pela adopção dessa tecnologia [8].

As metas de desempenho do sistema para LTE foram definidos pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) em 2005 e documentadas em 3GPP TR25.913 [9], juntamente com as metas de capacidades, complexidade, implantação e arquitetura. As principais medidas de desempenho do sistema são enumeradas a seguir:

- Taxa de transferência média, medida por MHz como a média dos usuários;
- Rendimento de usuário de ponta, medido por MHz nos 5% da distribuição de usuários (95% dos usuários com melhor desempenho);
- Eficiência do espectro, que indica o rendimento do sistema por setor em termos de bps/MHz.

Enquanto as soluções de tecnologia detalhados para LTE não devem ser base para os requisitos de desempenho, o número de antenas de transmissão e recepção configuradas para a estação base (eNB) e para o usuário (UE) devem ser acertados como pré-requisitos para as metas de desempenho. A razão é que um aumento no número de antenas podem também ser vistos como uma limitação para a solução selecionada devido ao aumento da complexidade. É, em teoria, possível obter ganhos irreais assumindo um número realista de antenas.

Na teoria, uma rede LTE alcança 300 Mbps de downlink e 75 Mbps de uplink. Na prática, esses números ficam em 100 Mbps de downlink e 50 Mbps de uplink, por conta dos overheads e das limitações da infraestrutura da rede. Os smartphones atuais, em teoria e na melhor das hipóteses, conseguem operar com velocidades de 7.2 Mbps de downlink e 348 Kbps de uplink. Ou seja, o LTE é pelo menos 10 vezes mais eficiente do que o aparelho.

As redes LTE são mais estáveis também. Essas redes permitem cerca de 200 acessos de usuários simultâneos (mais do que o dobro ofertado hoje), e funcionam de forma segura, mesmo quando em movimento, em velocidades de até 350 km/h [10].

O LTE suporta portadoras com largura de banda flexível, de menos de 5MHz até 20MHz nos modos de Frequency Division Duplex (FDD) ou Time Division Duplex (TDD). Dez faixas de espectro pareadas e quatro não-pareadas foram, até o momento, identificadas pelo 3GPP para LTE e há mais faixas em discussão a serem adicionadas em breve. Assim, uma operadora pode introduzir LTE em faixas novas. Em segundo lugar, os produtos LTE terão diversos aspectos que simplificam a construção e gerenciamento das redes de próxima

geração. Por exemplo, aspectos como instalação plug and play, autoconfiguração e auto-otimização simplificarão e reduzirão o custo de implantação e gerenciamento da rede. Em terceiro lugar, o LTE será implementado em paralelo com redes de transporte e núcleo baseado em IP simplificados, nos quais a construção, manutenção e introdução de serviços são mais fáceis.

Além dos telefones móveis, computadores e dispositivos eletrônicos, uma ampla variedade de terminais incorporarão módulos LTE. Como o LTE suporta handover e roaming para redes móveis existentes, todos esses dispositivos podem ter cobertura de banda larga móvel ubíqua desde o primeiro dia. Em resumo, as operadoras podem introduzir a flexibilidade do LTE para ir ao encontro dos objetivos de suas redes existentes, espectro e negócios para banda larga móvel e serviços multimídia [11].

Neste contexto, o próximo capítulo aborda especificamente a arquitetura e as tecnologias envolvidas em torno das redes LTE de quarta geração.

Buscando-se soluções para tornar a transmissão de dados mais eficiente, ao mesmo tempo em que o volume desse tráfego encontra-se em ascensão, o padrão LTE foi proposto como o próximo passo rumo ao sistema móvel de 4ª Geração (4G). Seu desenvolvimento visa fornecer melhorias de desempenho, além de reduzir o custo por bit, o que possibilita uma maior disseminação de serviços móveis. Sua padronização está a cargo do 3GPP. O sistema LTE adota a tendência para redes móveis de se basear no padrão IP, o protocolo principal da Internet. Com isso, o tráfego de voz será suportado principalmente através da tecnologia Voice over Internet Protocol (VoIP), possibilitando melhor integração com serviços de multimídia. A tecnologia LTE já se coloca em meio à transição do uso da comutação de circuito para a comutação de pacotes no tráfego de voz [12].

A compatibilidade com os sistemas anteriores é uma das exigências para uma tecnologia em termos de telefonia. Por esse aspecto, o LTE foi concebido para ser compatível

com as redes previamente estabelecidas, tanto as padronizadas pelo 3GPP como as demais.

Por basear-se no protocolo IP, com a transição de redes combinando comutação de circuito e pacotes, a arquitetura de núcleo do sistema deve ser simples. No LTE, essa arquitetura é conhecida como Evolved Packet Core (EPC), caracterizada pela simplicidade e pela integração com demais redes IP. Além desse núcleo EPC, existe a Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), que é responsável pela comunicação sem fio entre o UE e a eNB. Outro ponto chave da tecnologia LTE diz respeito à automação de processos de rede, conhecida como Self-Organizing Network (SON). Essa característica permite que as redes possam configurar-se e sincronizar-se com redes adjacentes sem intervenção direta dos usuários e administradores da rede [12].

Para aprofundar nestes aspectos, as subseções a seguir destacam as diversas características das redes LTE.

4.1 Arquitetura

Com uma arquitetura simplificada e interfaces abertas, o LTE tem o núcleo EPC baseado nos protocolos TCP/IP, uma importante ferramenta para a comunicação com diferentes redes, tanto fixas como móveis [12]. A arquitetura de rede EPC é modelada para permitir a integração com outras redes de comunicação baseadas no protocolo IP, utilizando a comutação por pacotes. Essa tecnologia também permite conectividade com outras formas de acesso, incluindo as padronizadas pelo 3GPP como as de banda larga fixa DSL.

A rede utilizada no LTE é considerada mais simples do que as utilizadas em redes anteriores, uma vez que os pacotes são processados e gerenciados no núcleo EPC. Esse processo produz respostas mais rápidas, melhorando a taxa de transmissão e o tempo de latência. O componente eNB passou a substituir as funções do Radio Network Controller (RNC) das redes UMTS, conectando-se diretamente ao núcleo EPC. O RNC realiza a gestão

de recursos de rádio, algumas das funções de gerenciamento de mobilidade e é o ponto onde a criptografia é feita antes que os dados do usuário sejam enviados entre os dispositivos.

Uma característica comum em redes sem fio é a rápida variação na taxa de transmissão de dados. A fim de contornar esse obstáculo, a arquitetura LTE faz uso de retransmissão no eNB para gerenciar tal variação. A adoção de mecanismos de controle de fluxo no núcleo principal da arquitetura EPC colabora para evitar perda de dados ou overflow [12].

O mecanismo Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) é aplicado para corrigir os pacotes de erros na camada física (PHY). Além disso, pode haver uma chance de que alguns pacotes ainda sejam deixados com erros que podem ser aceitáveis para algumas aplicações. Assim, estes são passados para as camadas superiores. O segundo mecanismo Automatic Repeat Request (ARQ) é implementado na camada Radio Link Control (RLC), que cuida desses erros residuais. Ele corrige esses erros ou descarta os pacotes.

4.2 Interface sem fio

A adoção de uma nova interface sem fio baseada na tecnologia Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) possibilita alcançar alta velocidade na transmissão de dados, com uma implementação de baixo custo e eficiente no consumo de energia. Tal inovação combina uma modulação baseada no OFDMA com esquema de múltiplo acesso para o downlink e SC-FDMA no uplink. A principal vantagem do SC-FDMA, em comparação com OFDM e OFDMA, é que os sinais apresentam um baixo Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), em outras palavras: um consumo reduzido de energia, o que diminui a necessidade de transmissores complexos e aumenta a vida útil da bateria. A Figura 4.1 ilustra um comparativo entre as transmissões em OFDMA e SC-FDMA.

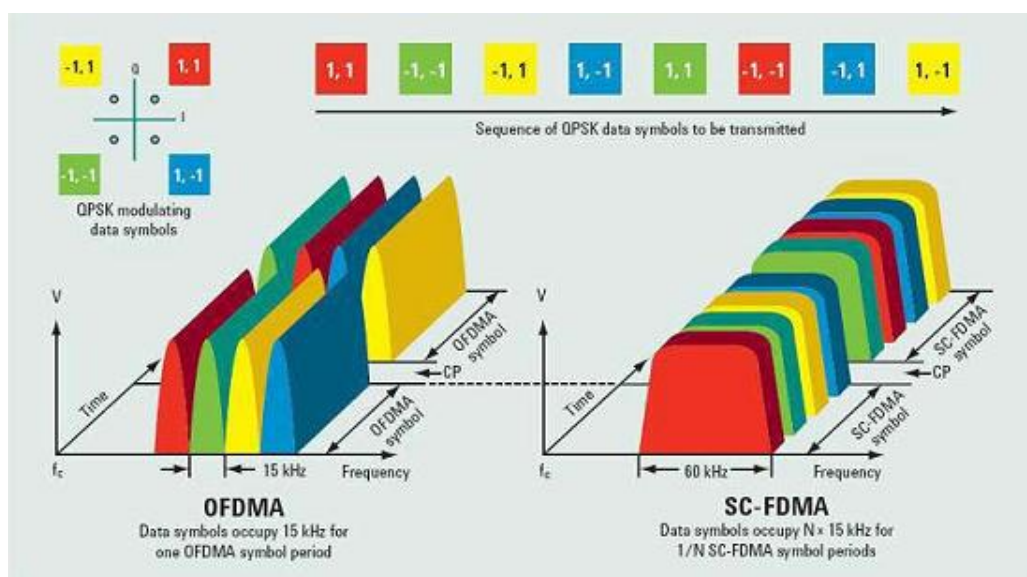


Figura 4.1: Transmissão utilizando OFDMA comparado com SC-FDMA [13].

No caso do LTE, o esquema proposto pela multiplexação OFDM divide o espectro disponível em diversos subcanais estreitos, cada um carregando parte do sinal ao máximo, sendo combinados posteriormente para gerar o dado transmitido. Feito isso, o OFDMA associa diferentes subcanais para usuários distintos, o que evita problemas causados por reflexões do sinal. Em seguida, os vários bits de um dado são enviados a baixas velocidades e combinados no receptor para formar uma mensagem de alta velocidade. [12]

A tecnologia LTE apresenta ótima performance em um tamanho de célula menores, com tamanhos aproximados de 5 km, mas em alguns cenários é possível alcançar um desempenho satisfatório em células maiores, com raio de até 30 km. Já para células muito grandes, de raio próximo de 100 km, o desempenho alcançado fica limitado [14], normalmente sendo utilizado apenas para comunicação por voz.

4.3 Múltiplas antenas

A fim de enviar dados através de diferentes caminhos, cujos sinais ocupam a mesma banda de radiofrequência simultaneamente, levando a altas taxas de transferência, a tecnologia LTE faz

uso da técnica Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). O sistema de antenas MIMO oferece grande confiabilidade e capacidade para os serviços de transmissão de dados sem fio. Essa técnica corresponde a um mecanismo eficiente de desviar dos limites impostos pela Lei de Shannon. A Figura 4.2 ilustra um sistema MIMO 2x2, com duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras de sinal.

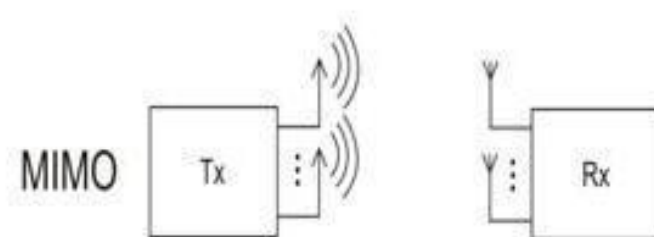


Figura 4.2: Sistema MIMO 2x2 [14].

A Lei de Shannon impõe um limite à quantidade de informação que pode ser transmitida em um canal de comunicação, fato devido à presença de ruído [20, 21]. A aplicação de outras técnicas de correção para ambientes com ruído, como redes celulares, tem aproximado o resultado do teto imposto pela Lei de Shannon.

O diferencial da técnica MIMO se baseia pelo fato de que a Lei de Shannon é aplicável a um único canal de transmissão. Como o sistema MIMO cria vários canais entre emissor e receptor, cada canal individualmente fica limitado, porém o conjunto de canais excede tal limite.

A primeira vista o MIMO parece até simples, mas o seu funcionamento é muito mais complexo do que os demais. A figura 4.3 ilustra o que acontece durante a transmissão em um cenário real [15].

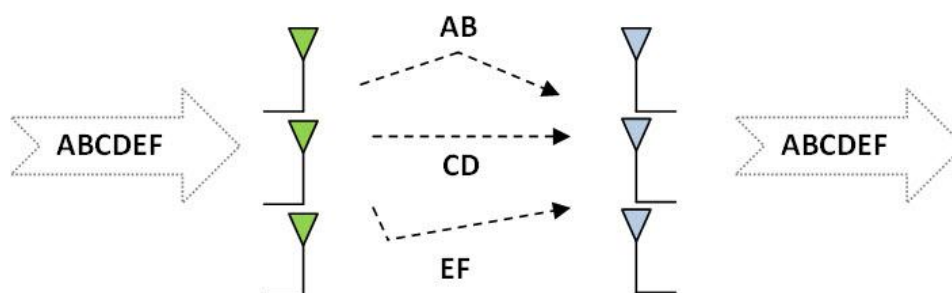


Figura 4.3: Cenário funcional do MIMO [15].

Existe uma complexidade muito grande sobre como o MIMO funciona, e suas variações. Uma boa analogia para ajudar na compreensão do conceito de MIMO é imaginar que temos duas bocas, e usamos as duas para perguntar a alguém: “Quantos Anos Você Tem?”

Observe que usamos 4 palavras. Como temos duas bocas, podemos usar uma para “Quantos Anos” e outra, ao mesmo tempo, para “Você Tem?”. Com as duas bocas falando ao mesmo tempo, se a outra pessoa estiver atenta ela conseguirá entender. Ou seja, falamos 4 palavras no mesmo tempo em que falaríamos 2 palavras.

O que isso representa? Em termos de dados, suponha que cada palavra tenha 100 KB. Então, estamos transmitindo 400 KB. Só que como estamos transmitindo 2 streams em paralelo, cada um com uma parte dos dados. Ou seja, transmitimos os 400 KB na metade do tempo que levaríamos para transmitir normalmente com um stream [15]. A Figura 4.4 ilustra este exemplo.

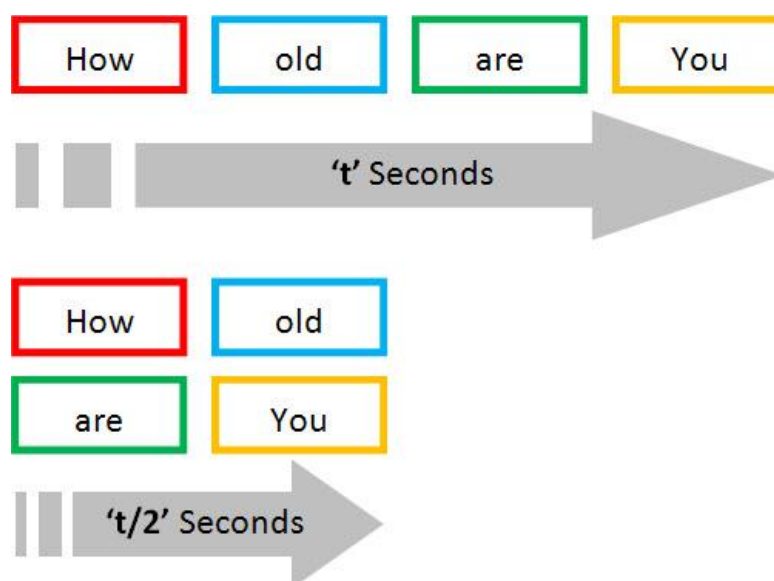


Figura 4.4: Exemplo de transmissão de dados com MIMO [15].

De forma simplificada, é isso o que o MIMO faz, e permite conseguir elevadas taxas de 300 até 600 Mbps. Assim, o MIMO é usado para melhorar o acesso wireless em um grande número de aplicações.

Para que o MIMO apresente vantagem é preciso que se tenha uma boa diversidade no sinal. Ou seja, qualquer coisa que interfira no caminho do sinal como prédios, automóveis, pessoas, etc. na verdade estão contribuindo para a eficiência geral do sistema, e a efetividade das aplicações MIMO. A diversidade do sinal – que não toma um caminho direto entre o transmissor – antes vista como um problema, agora é o que torna possível que os streams de dados sejam combinados e recuperados.

Vale lembrar que o multipercurso varia de acordo com a localização, e essa variação é bem dinâmica e difícil de se prever. Mesmo assim, o multipercurso torna possível que a antena receptora diferencie entre os dados que foram transmitidos no mesmo canal, ao mesmo tempo [15].

4.4 Qualidade de Serviço

Há assinantes premium que sempre querem ter uma melhor experiência do usuário em seu dispositivo 4G LTE. Esses usuários estão dispostos a pagar mais por alta largura de banda e melhor acesso à rede em seus aparelhos. Não só os assinantes, mas alguns serviços em si precisam de tratamento prioritário na rede (por exemplo, chamada VoIP). Para ser capaz de oferecer essa prioridade, o QoS desempenha um papel fundamental. QoS define prioridades para determinados clientes e serviços durante o tempo de alto congestionamento na rede.

Em uma rede LTE, o QoS é implementado entre UE e o gateway de pacote de dados da rede (PGW), e é aplicado a um conjunto de “beareres”. O bearer é basicamente um conceito virtual e é um conjunto de configurações de rede para fornecer um tratamento especial a fim de fixar o tráfego no caminho pela rede [16].

No LTE, o QoS é dividido em radio bearer, S1 bearer e S5/S8 bearer, denominados coletivamente como EPS Bearer, tal como mostrado na Figura 4.5.

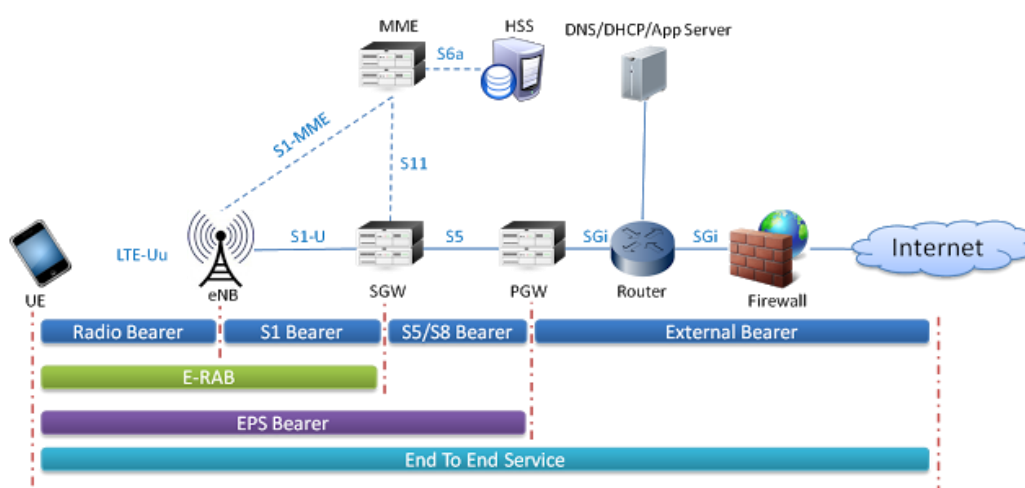


Figura 4.5: Diferentes bearers na comunicação LTE [16].

A fim de compreender o conceito de QoS, é preciso entender os tipos de bearer e as propriedades associadas a cada um deles através de um gráfico hierárquico, como mostrado

na Figura 4.6. Primeiro, existem dois tipos de bearer: dedicado e padrão. Há pelo menos um bearer padrão estabelecido quando UE está ligada a rede LTE, enquanto o bearer dedicado é sempre estabelecido quando existe uma necessidade de fornecer QoS para serviços específicos (como VoIP, vídeo, etc.) [16].

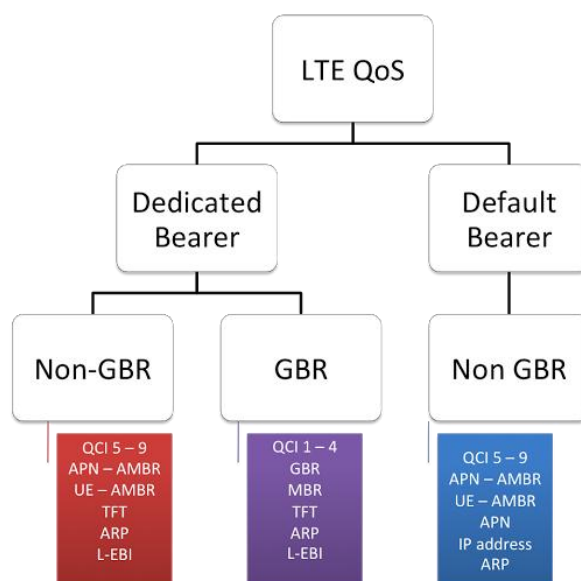


Figura 4.6: Divisão das bearers por tipo [16].

O bearer dedicado pode ser subdividido em Não-GBR e GBR. O GBR fornece taxa de bits garantida e está associado a parâmetros como GBR e MBR:

- GBR: A taxa de bits mínima é garantida por cada EPS bearer;
- MBR: A taxa de bits máxima é garantida por cada EPS bearer.

Tanto GBR quanto MBR são especificados de forma independente para uplink e downlink. Por outro lado, o bearer Não-GBR não fornece taxa de bits garantida e tem como parâmetro A-AMBR e UE-AMBR.

- A-AMBR: a taxa de bits máxima por Access Point Name (APN), que é um identificador presente no EPC. Ele é especificado de forma interdependente para uplink e downlink;

- UE-AMBR: a taxa de bits máxima por UE agregado é o máximo permitido do total de rendimento Não-GBR entre todos APN para a um UE específico.

O bearer padrão só pode ser do tipo Não-GBR. Alguns outros termos importantes associados a cada tipo de portador são discutidos abaixo:

- ARP: Prioridade de Atribuição e Retenção, é basicamente usado para decidir se uma nova modificação ou estabelecimento pedido no bearer deve ser aceito considerando a situação atual de recursos.
- TFT: Traffic Flow Template, ou Modelo de Fluxo de Tráfego, é sempre associado a bearer dedicado, enquanto o bearer padrão pode ou não ter TFT. Como mencionado anteriormente, o bearer dedicado fornece QoS para serviços especiais ou de aplicação e o TFT define regras para que o UE e a rede saibam qual pacote IP deve ser enviado em especial bearer dedicado. Ele geralmente tem regras sobre a base de destino/fonte do pacote IP fonte ou o protocolo usado.
- L-EBI: Linked EPS bearer ID, que diz ao bearer dedicado a qual bearer padrão ele está ligado.
- Endereço IP / PGW: cada bearer padrão está ligado a alguma PGW e tem seu próprio endereço IP, enquanto o bearer dedicado não precisa desta, uma vez que está ligada ao bearer padrão.

Pode-se também notar um outro parâmetro associado com todos os bearers, ou seja, classe de identificador QoS (QCI). Este parâmetro define basicamente características dos pacotes a nível IP, como mostrado na Figura 4.7 [16].

QCI	Bearer Type	Priority	Packet Delay	Packet Loss	Example
1	GBR	2	100 ms	10 ⁻²	VoIP call
2		4	150 ms	10 ⁻³	Video call
3		3	50 ms		Online Gaming (Real Time)
4		5	300 ms	10 ⁻⁶	Video streaming
5	Non-GBR	1	100 ms		IMS Signaling
6		6	300 ms		Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc
7		7	100 ms		Voice, Video, Interactive gaming
8		8	300 ms		10 ⁻⁶
9		9			

Figura 4.7: Classes de indicadores de QoS [16].

4.5 Flexibilidade de espectro

A eficiência no uso do espectro faz do sistema LTE um cenário apropriado para suportar um grande número de usuários dentro do espectro disponível, tendo uma largura de banda entre 1,4 Mhz e 20 Mhz. A flexibilidade nessa aplicação tem como resultado direto a resistência a interferências entre células na transmissão dos dados, permitindo aumentar o número de usuários por célula na rede. A Figura 4.8 ilustra as diferentes configurações de largura de banda.



Figura 4.8: Configurações de largura de banda do canal [13].

O suporte a FDD e TDD na mesma plataforma garante o aproveitamento de diferentes técnicas com o espectro. O FDD faz uso de duas faixas de frequências distintas, onde é possível enviar dados por uma frequência e recebê-los através de outra. Por sua vez, o TDD só utiliza uma única faixa de frequência, transmitindo e enviando em tempos diferentes [12].

Ao redor do mundo as redes de telefonia celular 4G LTE podem usar diversas faixas de frequência, que são padronizadas em uma especificação chamada E-UTRA. Atualmente

redes de telefonia celular 4G LTE no Brasil utilizam a banda E-UTRA número 7, na faixa de 2,5 GHz, que também é utilizada em outras regiões, tais como Europa, Canadá, Rússia, Malásia e Cingapura [17].

Nos EUA, as redes 4G LTE utilizam as bandas 12, 13, 14, 17 e 29 (mais conhecidas como SMH), dependendo da operadora. Todas essas bandas estão na faixa de 700 MHz, que no Brasil é usada para transmissões de TV UHF a partir do canal 52, atualmente usada para a transmissão de sinal de TV aberta no formato digital. Como nos EUA a transmissão de TV nessa faixa de frequência não existe mais, essa faixa pode ser usada pelas redes LTE. No Brasil, a faixa de 700 MHz será utilizada por redes de telefonia celular tão logo a transmissão de TV analógica deixe de existir e os canais digitais passem a utilizar as frequências atualmente usada pelas transmissões analógicas de TV aberta, o que estava originalmente programado para acontecer em 2016. No entanto, no Brasil utilizaremos a banda 28, também conhecida como APAC 700, que também será utilizada pela Austrália, Nova Zelândia, Japão, Chile, México e Uruguai. Em outras palavras, apesar de o Brasil passar a usar a faixa de 700 MHz no futuro, esta será dividida de maneira diferente do que ocorre nos Estados Unidos.

A Tabela 4.1 apresenta as diferentes faixas de frequência suportadas pelo LTE. Na coluna “Regiões”, são dados alguns exemplos. Quando um país ou região aparece em mais de uma linha, isso significa que o uso de uma banda ou de outra depende da operadora e da tecnologia usada. Por exemplo, a banda E-UTRA 1 é atualmente usada no Brasil por redes 3G, a banda 3 é atualmente usada no Brasil por redes GSM (2G) enquanto a banda 5 é a faixa de 850 MHz; originalmente usada pelo sistema AMPS (1G) e posteriormente usada pelos sistemas 2G IS-136 (TDMA) e IS-95 (CDMA) [17].

Banda E-UTRA	Apelido	Uplink	Downlink	Método	Regiões
1	IMT	1.920 MHz a 1.980 MHz	2.110 MHz a 2.170 MHz	FDD	Ásia, Brasil (3G), Coreia do Sul, Europa, Filipinas, Israel e Japão
2	PCS	1.850 MHz a 1.930 MHz	1.930 MHz a 1.990 MHz	FDD	América Latina, Canadá e EUA
3	DCS	1.710 a 1.785 MHz	1.805 a 1.880 MHz	FDD	África do Sul, Arábia Saudita, Austrália, Brasil (GSM), Cazaquistão, Cingapura, Coreia do Sul, Europa, Hong Kong, Japão, Nova Zelândia e Sri Lanka
4	AWS	1.710 a 1.755 MHz	2.110 a 2.155 MHz	FDD	América Latina, Canadá e EUA
5	CLR	824 a 849 MHz	869 a 894 MHz	FDD	Américas (incluindo Brasil e EUA), Coreia do Sul e Israel (antiga faixa AMPS “1G”)
6	UMTS 800	830 a 840 MHz	875 a 885 MHz	FDD	
7	IMT-E	2.500 a 2.570 MHz	2.620 a 2.690 MHz	FDD	Austrália, América Latina, Brasil, Canadá, Cingapura, Europa, Hong King, Malásia e Rússia
8	GSM-900	880 a 915 MHz	925 a 960 MHz	FDD	Austrália, Europa e Japão
9	UMTS 1800	1.749,9 a 1.784,9 MHz	1.844,9 a 1.879,9 MHz	FDD	
10	Extended AWS	1.710 a 1.770 MHz	2.110 a 2.170 MHz	FDD	Equador, Peru e Uruguai
11	PDC	1.427,9 a 1.447,9 MHz	1.475,9 a 1.495,9 MHz	FDD	Japão
12	SMH	699 a 716 MHz	729 a 746 MHz	FDD	EUA
13	SMH	777 a 787 MHz	746 a 756 MHz	FDD	EUA
14	SMH	788 a 798 MHz	758 a 768 MHz	FDD	EUA
17	SMH	704 a 716 MHz	734 a 746 MHz	FDD	EUA
18	Japan Lower 800	815 a 830 MHz	860 a 875 MHz	FDD	Japão
19	Japan Upper 800	830 a 845 MHz	875 a 890 MHz	FDD	Japão
20	Digital Dividend	832 a 862 MHz	791 a 821 MHz	FDD	Europa e Rússia

21	PDC	1.447,9 a 1.462,9 MHz	1.495,9 a 1.510,9 MHz	FDD	Japão
22		3.410 a 3.490 MHz	3.510 a 3.590 MHz	FDD	
23	Banda S	2.000 a 2.020 MHz	2.180 a 2.200 MHz	FDD	EUA
24	Banda L	1.626,5 a 1.660,5 MHz	1.525 a 1.559 MHz	FDD	EUA
25	Extended PCS	1.850 a 1.915 MHz	1.930 a 1.995 MHz	FDD	EUA
26	Extended CLR	814 a 849 MHz	859 a 894 MHz	FDD	EUA
27	SMR	806 a 824 MHz	851 a 869 MHz	FDD	
28	APAC 700	703 a 748 MHz	758 a 803 MHz	FDD	Austrália, Brasil, Chile, Japão, México, Nova Zelândia e Uruguai
29	SMH	1.850 a 1.910 MHz ou 1.710 a 1.755 MHz	716 a 728 MHz	FDD	EUA
30	WCS	2.305 a 2.315 MHz	2.350 a 2.360 MHz	FDD	EUA
33		1.900 a 1.920 MHz		TDD	Europa
34		2.010 a 2.025 MHz		TDD	Europa
35	PCS uplink	1.850 a 1.910 MHz		TDD	
36	PCS downlink	1.930 a 1.990 MHz		TDD	
37	PCS guardband	1.910 a 1.930 MHz		TDD	
38		2.570 a 2.620 MHz		TDD	Arábia Saudita, Brasil, China, Europa e Rússia
39		1.880 a 1.920 MHz		TDD	China
40		2.300 a 2.400 MHz		TDD	África do Sul, Arábia Saudita, Austrália, China e Índia
41	BRS/EBS	2.496 a 2.690 MHz		TDD	EUA e Japão
42		3.400 a 3.600 MHz		TDD	Reino Unido
43		3.600 a 3.800 MHz		TDD	Reino Unido
44	APAC 700	703 a 803 MHz		TDD	

Tabela 4.1: Faixas de frequência de banda utilizadas no mundo [17].

As redes de telefonia celular 4G LTE utilizam atualmente no Brasil a banda E-UTRA 7, mais conhecida como faixa de 2,5 GHz, com frequências de 2500 MHz a 2570 MHz

para uplink e de 2620 MHz a 2690 MHz para downlink. Essas faixas de frequência são divididas em 5 subfaixas, chamadas P (10 MHz), W (20 MHz), V1 (10 MHz), V2 (10 MHz) e X (20 MHz). As subfaixas W, V1, V2 e X foram leiloadas para uso em todo o território nacional, enquanto que a subfaixa P é reservada para uso regional.

Além disso, no Brasil utilizamos a banda E-UTRA 38 para sistemas TDD. Essa banda utiliza a faixa de frequência antigamente utilizada por sistemas de televisão por assinatura que usavam transmissão sem fio com tecnologia MMDS. Essa banda vai de 2570 MHz a 2620 MHz e é dividida em duas subfaixas, T (15 MHz) e U (35 MHz). Atualmente a subfaixa T ainda não é utilizada e a subfaixa U é usada pelas operadoras de TV por assinatura que utilizavam o sistema MMDS.

Na Tabela 4.2 temos a descrição destas subfaixas de frequência [17].

Subfaixa	Uplink	Downlink	Largura	Operadora
P	2.500 a 2.510 MHz	2.620 a 2.630 MHz	10 MHz	Depende da região
W	2.510 a 2.530 MHz	2.630 a 2.650 MHz	20 MHz	Claro
V1	2.530 a 2.540 MHz	2.650 a 2.660 MHz	10 MHz	TIM
V2	2.540 a 2.550 MHz	2.660 a 2.670 MHz	10 MHz	Oi
X	2.550 a 2.570 MHz	2.670 a 2.690 MHz	20 MHz	Vivo
T	2.570 a 2.585 MHz		15 MHz	Não leiloado
U	2.585 a 2.620 MHz		35 MHz	Sky e SuperTV

Tabela 4.2: Utilização das subfaixas de frequência no Brasil [17].

A Figura 4.9 ilustra graficamente a divisão de frequências apresentada na Tabela 4.2.

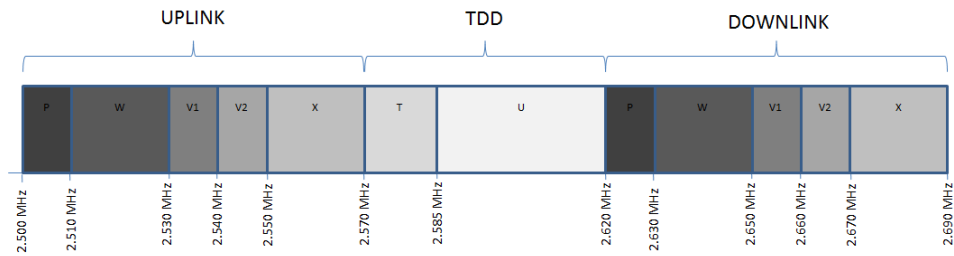


Figura 4.9: Representação gráfica do espectro utilizado no Brasil [17].

5 Simulações e Resultados

Nesse capítulo serão apresentados o simulador de rede ns3, bem como as simulações de rede LTE realizadas e seus resultados.

5.1 O simulador de redes ns3

O ns3 é um simulador de redes baseado em eventos discretos, desenvolvido especialmente para pesquisa e uso educacional. O projeto ns3 iniciou em 2006 e tem seu código aberto. A documentação completa do ns3 e trechos do código fonte são apresentados no site do simulador para os interessados em aprofundar-se no funcionamento do sistema.

O ns3 não é uma extensão do ns2. O ns3 é um simulador novo. Ambos são escritos em C++, mas o ns3 é totalmente novo e não suporta as APIs da versão anterior. Algumas funcionalidades do ns2 já foram portadas para o ns3. O projeto continuará mantendo o ns2 enquanto o ns3 estiver em fase de desenvolvimento e formas de integração e transição estão em estudo.

Além de ser um projeto de código aberto, o ns3 realiza um grande esforço para manter um ambiente aberto para pesquisadores que queiram contribuir e compartilhar software com o projeto. O ns3 é um simulador para pesquisas e de uso educacional, feito por e para pesquisadores. Este conta com contribuições da comunidade para desenvolver novos modelos, corrigir erros ou manter códigos e compartilhar os resultados. Existem políticas de incentivo para que as pessoas contribuam com o projeto, assim como foi feito no ns2.

5.1.1 O módulo LTE

Para construir uma simulação LTE utilizando o ns3, o código começa pelo carregamento de módulos através da inclusão dos arquivos:

```
#include "ns3/lte-module.h"
```

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
```

Os arquivos a serem incluídos são agrupados em módulos relativamente grandes, de forma a ajudar os usuários. Também é possível fazer referência a um único arquivo que irá recursivamente carregar todas as bibliotecas de cada módulo. Ao invés de procurar pelo arquivo exato, e provavelmente, ter que resolver dependências, é possível carregar um grupo de arquivos de uma vez. Esta com certeza não é a abordagem mais eficiente, mas permite escrever códigos de forma bem mais fácil.

Durante a construção, cada um dos arquivos incluídos é copiado para o diretório chamado ns3 (dentro do diretório build), o que ajuda a evitar conflito entre os nomes dos arquivos de bibliotecas. O arquivo ns3/lte-module.h, por exemplo, corresponde ao módulo que está no diretório src/lte. Há um grande número de arquivos neste diretório. No momento da construção do projeto, a ferramenta de compilação waf copia os arquivos para o diretório ns3, no subdiretório .

Uma visão geral do módulo de simulação LTE-EPC é retratada na Figura 5.1. Existem dois componentes principais:

- O modelo LTE, que inclui a pilha do protocolo de Radio LTE (RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY). Estas entidades residem totalmente dentro do UE e dos nós eNB.
- O modelo EPC, que inclui as interfaces de rede do núcleo, protocolos e entidades. Estas entidades e protocolos residem dentro dos nós SGW, PGW e MME, e parcialmente dentro dos nós eNB.

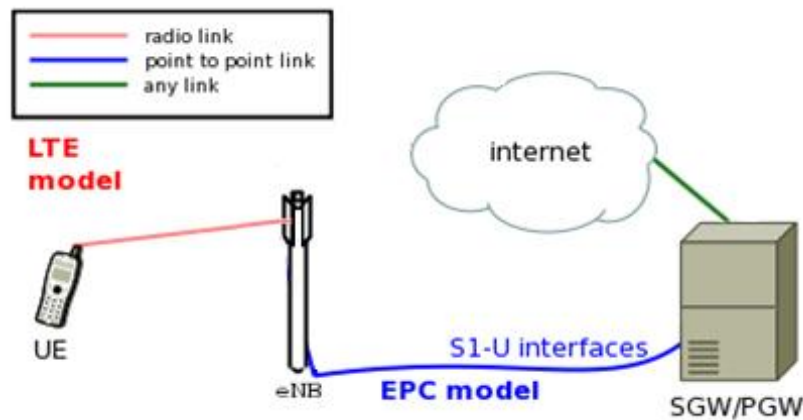


Figura 5.1: Modelo de simulação do LTE-EPC no ns3.

5.1.2 Dispositivos LTE

Todas as funcionalidades comuns dos dispositivos de rede LTE foram definidos na classe `ns3::LteNetDevice`. Além disso, o dispositivo LTE foi concebido como um recipiente de várias entidades, como MAC, RRC, RLC. Para cada uma destas entidades uma classe específica foi desenvolvida [18].

O módulo LTE é perfeitamente integrado todo o projeto ns3. Já é possível anexar a cada dispositivo de uma pilha de protocolos TCP/IP e todas as aplicações implementadas (ou seja, clientes e servidores de tráfego TCP e UDP, por exemplo).

A entidade RRC é implementada pela classe `ns3::RrcEntity`, e fornece apenas a funcionalidade de gerenciamento dos bearers de rádio. Um bearer dedicado é criado para cada fluxo de downlink ou uplink. A entidade RRC realiza a classificação dos pacotes que chegam a partir da camada superior para a correspondente no bearer de rádio. Esta classificação é baseada nas informações fornecidas pela classe `ns3::IpcsClassifierRecord`.

A classe `ns3::MacEntity` proporciona uma implementação básica da entidade MAC para o dispositivo LTE. Além disso, as classes `ns3::EnbMacEntity` e `ns3::UeMacEntity`, herdadas da anterior, fornecem uma implementação para o eNB e para a entidade UE MAC, respectivamente. Em todas as entidades MAC é definido o módulo AMC. Além disso, para a

classe `ns3::EnbMacEntity` são definidos também controladores de uplink e downlink [18].

5.1.3 Escopo e limitações

A estrutura foi projetada de modo a suportar a transmissão de dados, tanto para uplink e downlink. É importante notar que transmissões downlink e uplink são gerenciadas pelo escalonador de pacotes que trabalha no eNB. Ele decide, de fato, para quais UEs devem ser agendadas as transmissões a cada TTI e quais recursos de rádio devem ser alocados para eles.

Na implementação atual, a transmissão downlink é administrada pelo escalonador de pacote downlink. Além disso, nenhum escalonador de pacotes foi desenvolvido para uplink. Como consequência, para o downlink, pacotes são enviados somente após decisões de agendamento; para o uplink, em vez disso, pacotes são enviados diretamente, sem qualquer decisão de agendamento. Por fim, a transmissão de mensagens de controle é feita por um canal de controle ideal [18].

5.2 Simulações LTE

Para fins de avaliação das taxas de transferência em uma rede LTE simples, construímos um cenário com apenas uma estação base e um cliente, parado próximo à antena. Utilizamos os protocolos UDP e TCP tanto para tráfego uplink quanto para tráfego downlink, utilizando um canal de 20 MHz e os demais parâmetros com o valor padrão do ns3. O cenário de simulação utilizado para gerar estes resultados encontra-se no Apêndice A desta monografia.

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações para as diferentes combinações de tráfego: tráfego uplink em UDP (Figura 5.2), tráfego downlink em UDP (Figura 5.3), tráfego uplink e downlink simultâneo em UDP (Figura 5.4), tráfego uplink em TCP (Figura 5.5), tráfego downlink em TCP (Figura 5.6), e tráfego uplink e downlink simultâneo em TCP (Figura 5.7).

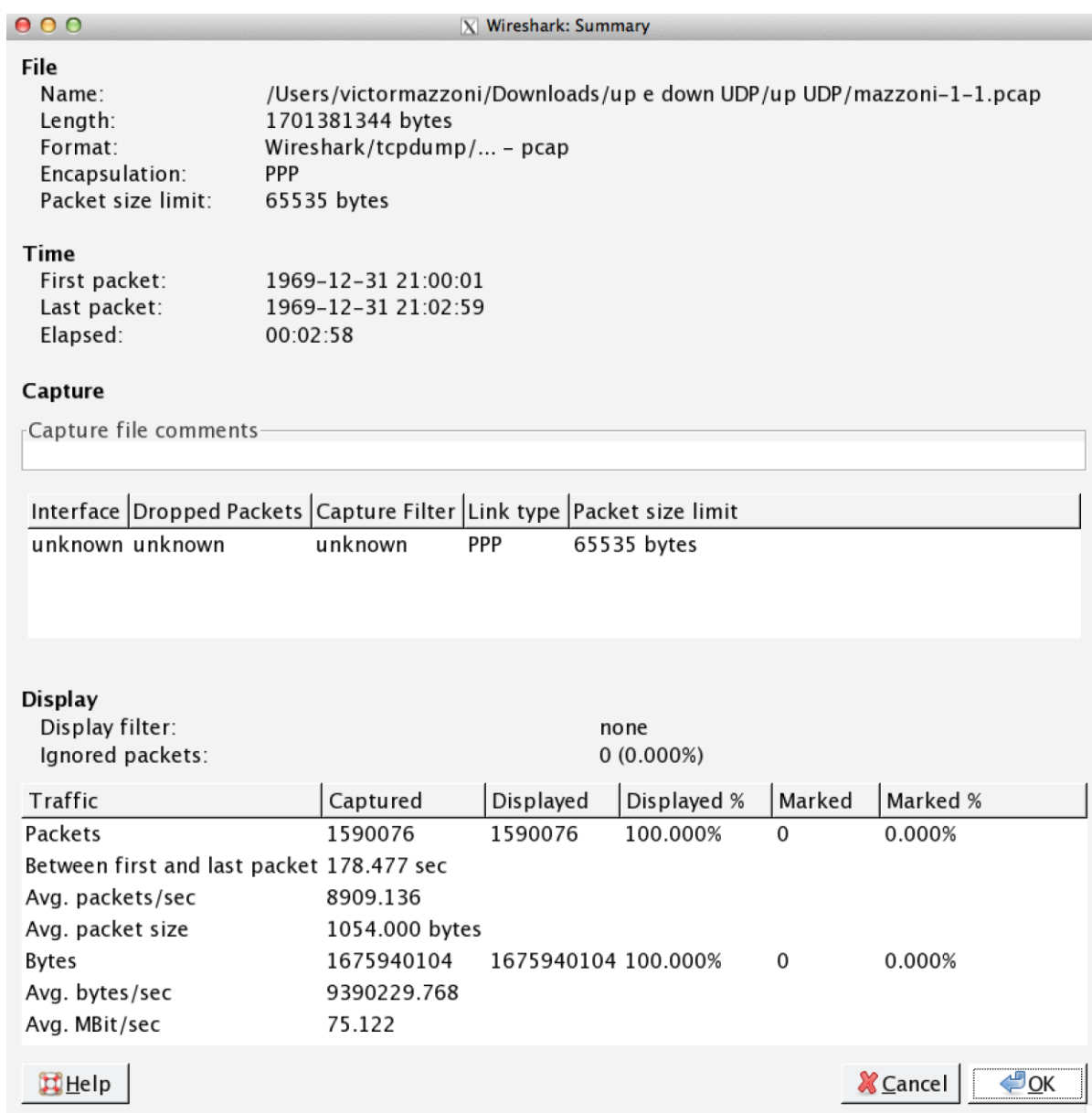


Figura 5:2: Tráfego UDP uplink.



Figura 5:3: Tráfego UDP downlink.

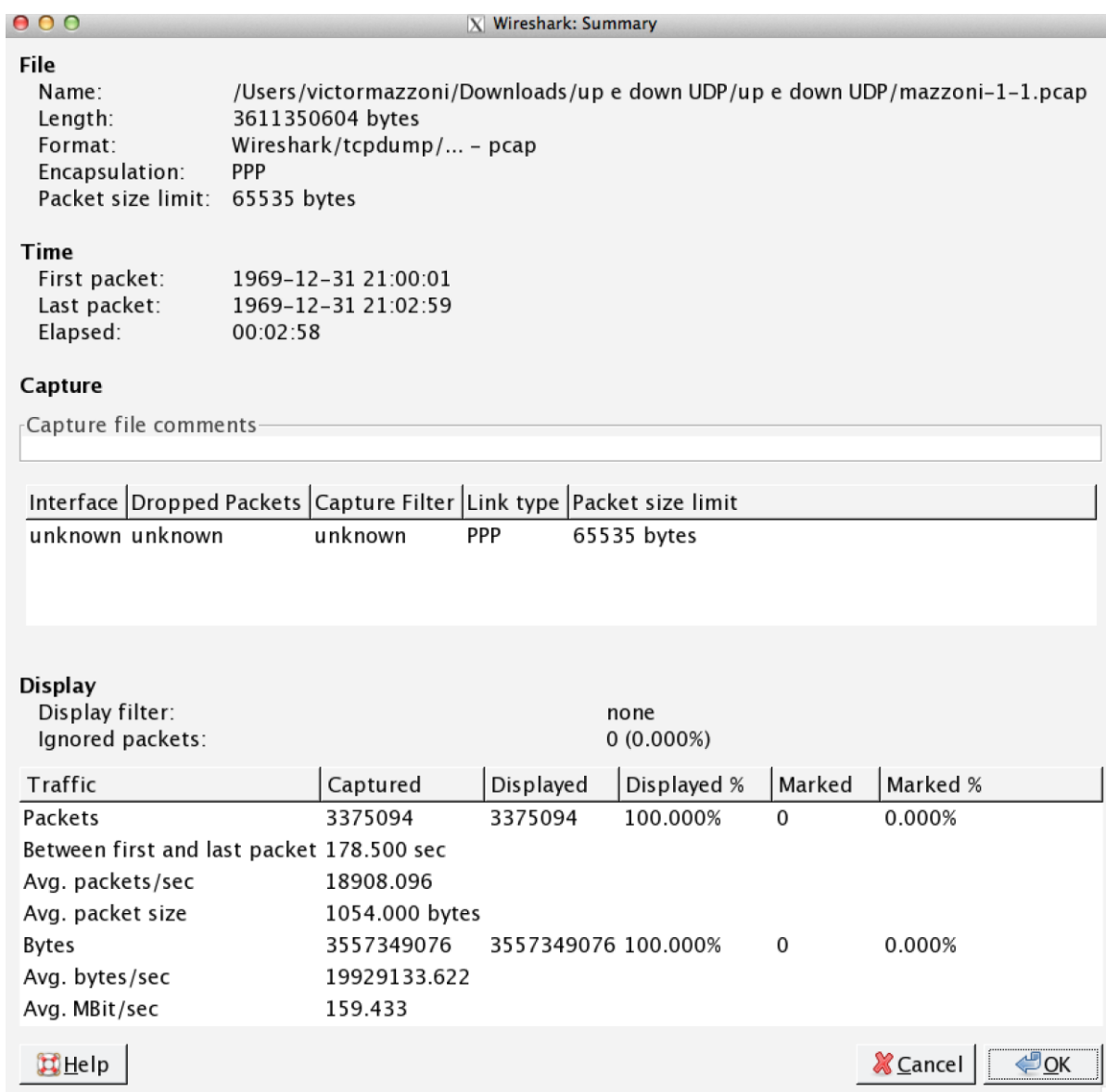


Figura 5:4: Tráfego UDP simultâneo em uplink e downlink.



Figura 5:5: Tráfego TCP uplink.



Figura 5:6: Tráfego TCP downlink

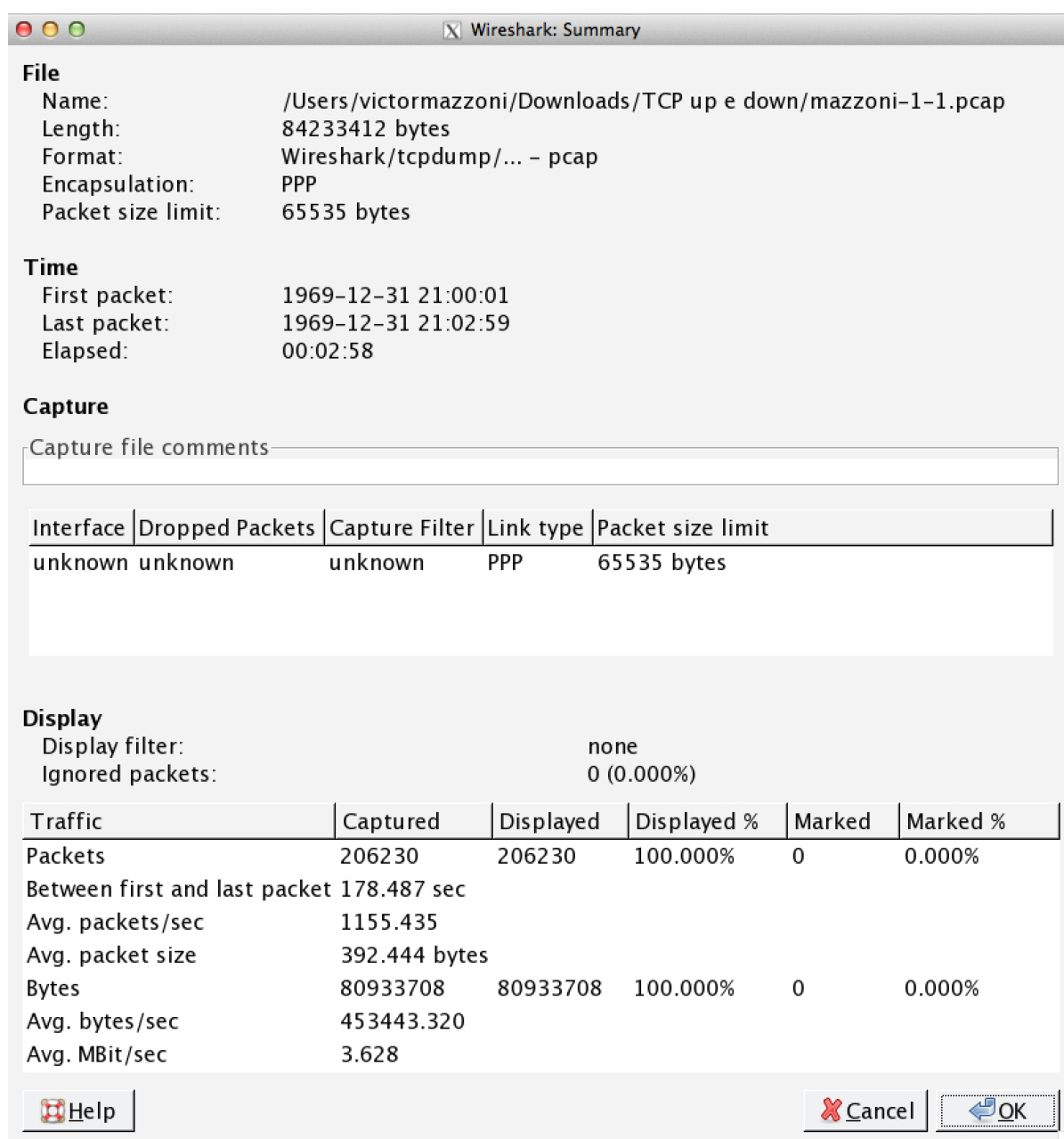


Figura 5:7: Tráfego TCP simultâneo em uplink e downlink.

5.3 Análise dos resultados

Observando os resultados é possível comprovar o alto desempenho alcançado pelas redes LTE, chegando a velocidades próximas de 100 Mbps. Entretanto, os valores médios para conexões TCP são bem moderados, ainda assim, superiores aos alcançados pelas antigas redes 3G. Os valores alcançados estão comparados nos gráficos a seguir (Figuras 5.8 à 5.11).

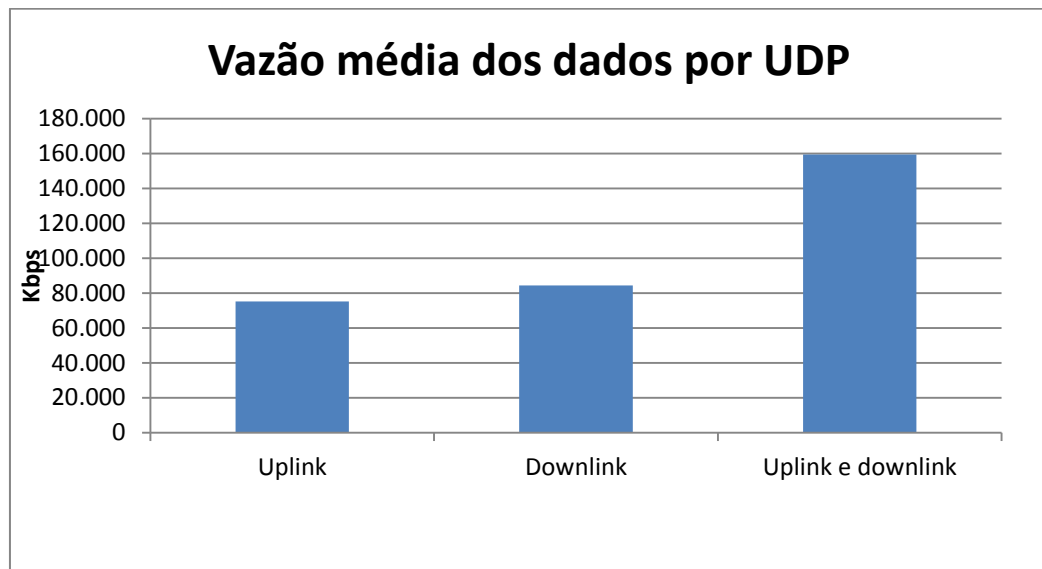


Figura 5:8: Vazão média de dados com tráfego UDP.

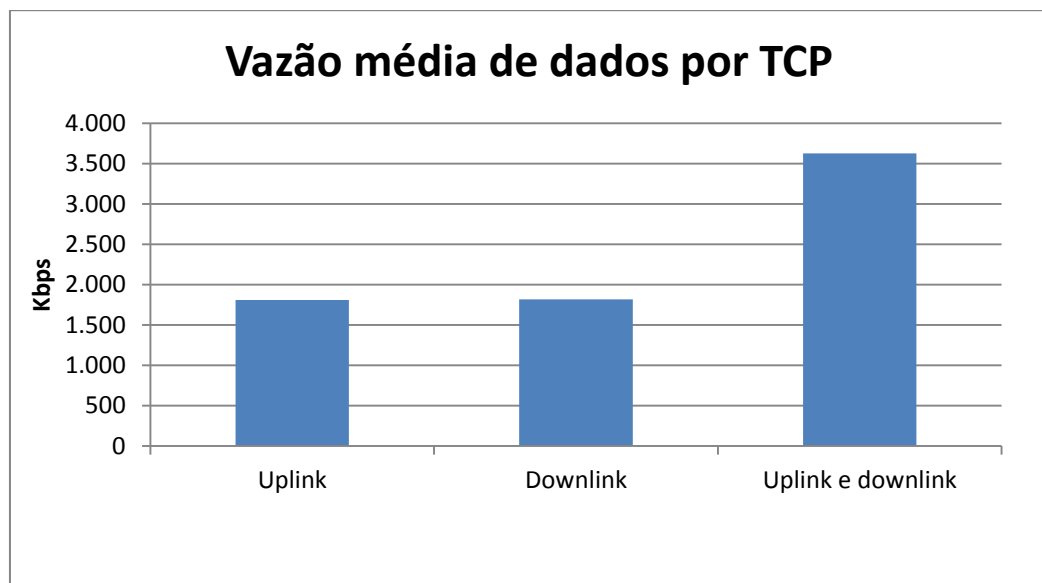


Figura 5:9: Vazão média de dados com tráfego TCP.

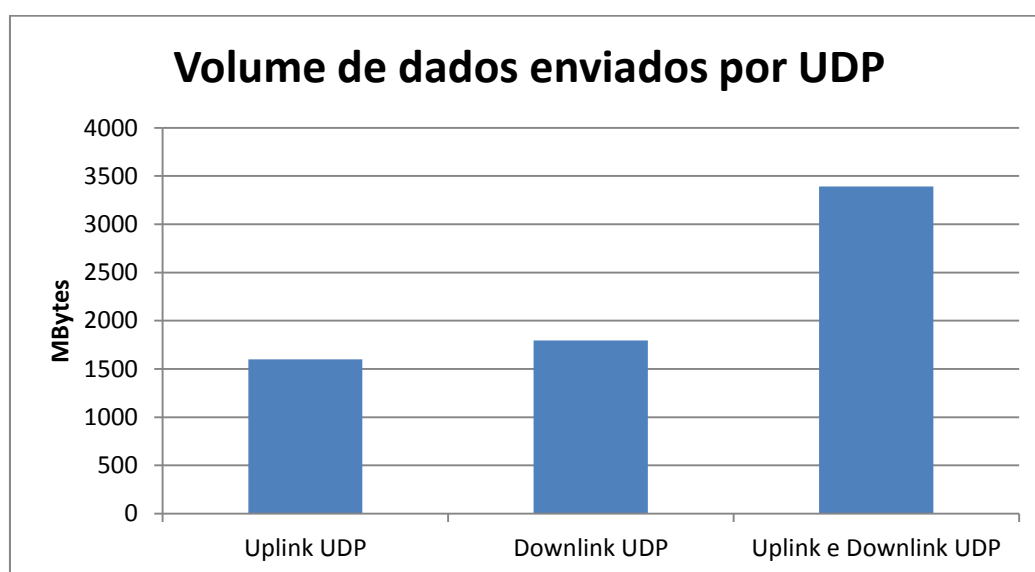


Figura 5:10: Volume de dados com tráfego UDP.

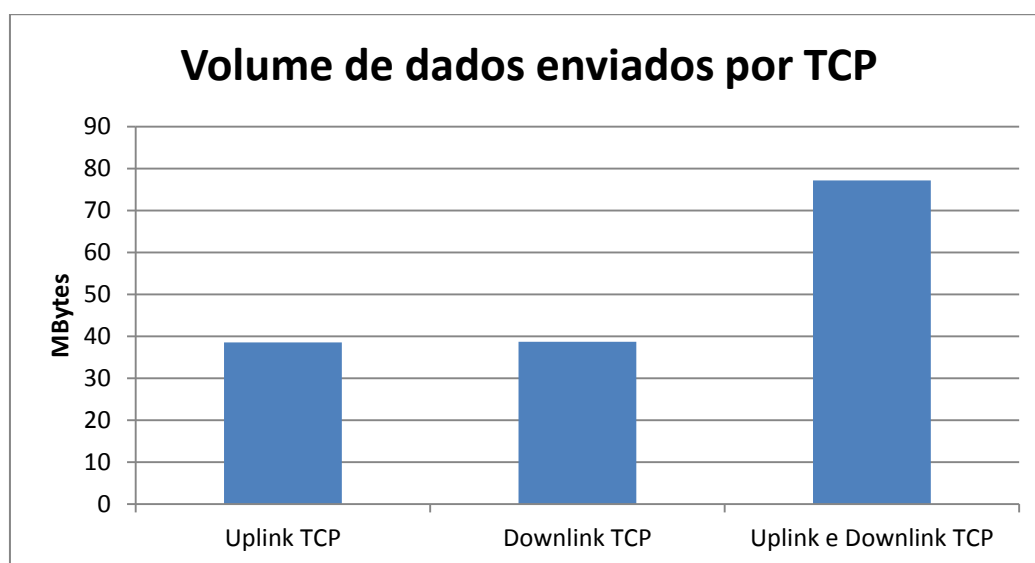


Figura 5:11: Volume de dados com tráfego TCP.

No cenário avaliado, observamos que a maior vazão média de dados foi obtida quando se utilizou o tráfego UDP (tanto em downlink como uplink). Esse melhor resultado é justificado pela própria essência do protocolo, que dispensa as estratégias de controle implementadas pelo TCP. É importante considerar que os canais de downlink e uplink são distintos, o que caracteriza uma comunicação full-duplex e justifica o dobro de vazão alcançada para os cenários com tráfego simultâneo em ambas direções.

6 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um histórico da evolução da telefonia celular. Foram abordadas em detalhes a capacidade e a eficiência das redes 4G LTE, através tanto de pesquisas teóricas como através de resultados obtidos por simulações no ns3. Com este trabalho foi possível obter uma visão efetiva sobre o desempenho da rede em cenários específicos.

Com este trabalho foi possível aprofundar o conhecimento nesse tipo de tecnologia e também obter resultados satisfatórios e otimistas quanto a um possível desempenho real em comparação ao que é prometido pelas especificações da tecnologia, comprovando dessa maneira que os dados anunciados se aproximam bastante dos dados obtidos nas simulações.

Como trabalho futuro, pode-se enumerar a avaliação de desempenho desta tecnologia em outros cenários, como cenários envolvendo mobilidade de usuários e handover entre estações base.

Referências bibliográficas

- [1] Schiller, J. H. **Mobile Communications**. 2. ed., Pearson Education, 2008.
- [2] Pramuko, A. **Telekomunikasi dan Teknologi Selular**, Online, 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/o7lxo6o>. Último acesso em 12/07/2014.
- [3] Dahlman, E.; Parkvall, S.; Skold, J.; Beming, P. **3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband**. 2. ed., Academic Press, 2007.
- [4] Brain, M.; Grabianowski, E. **How WiMAX Works**. Online, 2004. Disponível em: <http://tinyurl.com/6yt5a>. Último acesso em 22/04/2014.
- [5] Intel. **O que é WiMAX?** Online, 2008. Disponível em: <http://tinyurl.com/pr8tkxt>. Último acesso em 22/04/2014.
- [6] Terra. **Wimax, a Internet sem fio do futuro**. Online, Disponível em: <http://tinyurl.com/mnc2654>. Último acesso em 23/04/2014.
- [7] Floro, P. **Falta infraestrutura para 4G no Brasil, diz especialista. Governo promete acesso para Copa do Mundo**. Online, 2012. Disponível em: <http://tinyurl.com/o36mok7>. Último acesso em 30/04/2014.
- [8] Wikipedia. **Long Term Evolution**. Online, 2014. Disponível em: <http://tinyurl.com/3lrqqs8>. Último acesso em 02/05/2014.
- [9] Gonçalves, J. **Análise de Desempenho dos Sistemas LTE e LTE-Advanced com base em Simuladores**. Instituto Superior Técnico, Julho 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa.
- [10] Silva, A. **Redes 4G: entenda as diferenças e os benefícios**. Online, 2012. Disponível em: <http://tinyurl.com/pxruf36>. Último acesso em 05/05/2014.
- [11] Teleco. **LTE (Long Term Evolution): A Evolução das Redes 3G**. Online, 2009. Disponível em: <http://tinyurl.com/pwnave3>. Último acesso em 23/05/2014.
- [12] Guedes, L.; Vasconcelos, R. **UMTS, HSPA e LTE**. Online, 2009. Disponível em: <http://tinyurl.com/nrfnpoy>. Último acesso em 30/05/2014.
- [13] Villanueva, U. **Coexistência entre as Tecnologias de 3ª e 4ª Gerações**.

Departamento de Engenharia Elétrica, Abril 2011. Dissertação de mestrado – PUC Rio.

- [14] Nikolofski, D. **A Quarta Geração das Redes Sem Fio: Benefícios e Evolução**. 2011. Monografia – Programa de Pós-Graduação em Teleinformática e Redes de Computadores, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [15] Pedrini, L. **O que é MIMO?** Online, 2011. Disponível em: <http://tinyurl.com/okjj6nr>. Último acesso em 02/06/2014.
- [16] Basir, A. **Quality of Service (QoS) in LTE**. Online, 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/lma5wpn>. Último acesso em 03/06/2014.
- [17] Torres, G. **Faixas de Frequência Usadas por Redes 4G LTE**. Online, 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/ksdxh3p>. Último acesso em 05/06/2014.
- [18] ns3 project. **Ns3 Tutorial**. Online, 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/obppazp>. Último acesso em 02/06/2014.
- [19] ns3 project. **Ns3 Model Library**. Online, 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/m8jbmox>. Último acesso em 12/06/2014.
- [20] Ferraz, I. **Transmissão da Informação**. Online, 2013. Disponível em: www.ic.uff.br/~ferraz/REDES/RCCAP02.DOC. Último acesso em 16/07/2014.
- [21] Saade, D. **Nível Físico**. Online, 2009. Disponível em: <http://www.midiacom.uff.br/~debora/redes1/pdf/cap2.pdf>. Último acesso em 16/07/2014.
- [22] Makino, I. **Desempenho de Sistemas Smart Grid sob plataforma de transmissão LTE**. Online, 2013. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/pedroso/Monografias/TCC-IudyMakino-2013.pdf>. Último acesso em 16/07/2014.

Apêndice A – Cenário de simulação

```

/* -*- Mode: C++; c-file-style: "gnu"; indent-tabs-mode:nil; -*- */
/*
 * Copyright (c) 2014 Federal University of Juiz de Fora (UFJF)
 *
 * This program is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License version 2 as
 * published by the Free Software Foundation;
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program; if not, write to the Free Software
 * Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA
 *
 * Author: Victor Mazzoni <victorsmazzoni@gmail.com>
 */

#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/buildings-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"

using namespace ns3;

int main (int argc, char *argv[])
{
    // Parametros da simulação
    bool downlink = true;
    bool uplink = false;
    bool tcp = false;
    bool udp = true;
    uint16_t simTime = 31;

    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("simTime", "Simulation time (s)", simTime);
    cmd.AddValue ("down", "Downlink traffic", downlink);
    cmd.AddValue ("up", "Uplink traffic", uplink);

```

```

cmd.AddValue ("tcp", "TCP traffic", ping);
cmd.AddValue ("udp", "UDP traffic", voip);
cmd.Parse (argc, argv);

// Parametros pro tráfego udp
uint32_t MaxPacketSize = 1024;
Time interPacketInterval = Seconds (0.0001);
uint32_t maxPacketCount = 2147483647;

// Configuring dl and up transmission bandwidth in number of RBs
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbNetDevice::UlBandwidth", UintegerValue (100));
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth", UintegerValue (100));

// Create lte and epc helpers
Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();
Ptr<PointToPointEpcHelper> epcHelper = CreateObject<PointToPointEpcHelper> ();
lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);
Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode (); // LTE EPC gateway

// Create a single RemoteHost
NodeContainer remoteHostContainer;
remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
InternetStackHelper internet;
internet.Install (remoteHostContainer);

// Create the Internet
PointToPointHelper p2ph;
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100Gbps")));
p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UintegerValue (1500));
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.010)));
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw, remoteHost);
Ipv4AddressHelper ipv4h;
ipv4h.SetBase ("10.1.0.0", "255.255.0.0");
Ipv4InterfaceContainer internetIpIfaces = ipv4h.Assign (internetDevices);
Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpIfaces.GetAddress (1);
Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
Ptr<Ipv4StaticRouting> remoteHostStaticRouting =
    ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (remoteHost->GetObject<Ipv4> ());
remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"),
    Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);

// Create Nodes: eNB and UE
NodeContainer enbNodes;
NodeContainer ueNodes;
enbNodes.Create (1);
ueNodes.Create (1);
Ptr<Node> ueNode = ueNodes.Get (0);

// Install Mobility Model

```

```

MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (enbNodes);
BuildingsHelper::Install (enbNodes);
mobility.Install (ueNodes);
BuildingsHelper::Install (ueNodes);

// Create Devices and install them in the Nodes (eNB and UE)
NetDeviceContainer enbDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);
NetDeviceContainer ueDevs = lteHelper->InstallUeDevice (ueNodes);

// Install the IP stack on the UE
internet.Install (ueNodes);
Ipv4InterfaceContainer ueIpIfaces = epcHelper->AssignUeIpv4Address
    (NetDeviceContainer (ueDevs));

// Set the default gateway for the UE
Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting
    (ueNode->GetObject<Ipv4> ());
ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);

// Attach the UE to a eNB
lteHelper->Attach (ueDevs, enbDevs.Get (0));

// Install a TCP application
ApplicationContainer clientApps;
ApplicationContainer serverApps;

uint16_t dlPort = 10000;
uint16_t ulPort = 20000;
if (tcp)
{
    if (downlink)
    {
        BulkSendHelper dlClientHelper ("ns3::TcpSocketFactory",
            InetSocketAddress (ueIpIfaces.GetAddress (0), dlPort));
        dlClientHelper.SetAttribute ("MaxBytes", UintegerValue (0));
        clientApps.Add (dlClientHelper.Install (remoteHost));
        PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::TcpSocketFactory",
            InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), dlPort));
        serverApps.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ueNode));
    }
    if (uplink)
    {
        BulkSendHelper ulClientHelper ("ns3::TcpSocketFactory",
            InetSocketAddress (remoteHostAddr, ulPort));
        ulClientHelper.SetAttribute ("MaxBytes", UintegerValue (0));
        clientApps.Add (ulClientHelper.Install (ueNode));
        PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::TcpSocketFactory",
            InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), ulPort));
    }
}

```

```

        serverApps.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));
    }
}
if (udp)
{
    if (downlink)
    {
        UdpClientHelper dlClientHelper (ueIpIfaces.GetAddress (0), dlPort);
        dlClientHelper.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (maxPacketCount));
        dlClientHelper.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
        dlClientHelper.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (MaxPacketSize));
        clientApps.Add (dlClientHelper.Install (remoteHost));
        PacketSinkHelper dlPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory",
            InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), dlPort));
        serverApps.Add (dlPacketSinkHelper.Install (ueNode));
    }
    if (uplink)
    {
        UdpClientHelper ulClientHelper (remoteHostAddr, ulPort);
        ulClientHelper.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (maxPacketCount));
        ulClientHelper.SetAttribute ("Interval", TimeValue (interPacketInterval));
        ulClientHelper.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (MaxPacketSize));
        clientApps.Add (ulClientHelper.Install (ueNode));
        PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory",
            InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), ulPort));
        serverApps.Add (ulPacketSinkHelper.Install (remoteHost));
    }
}
serverApps.Start (Seconds (0));
clientApps.Start (Seconds (1));

// Output traces
FlowMonitorHelper flowmonHelper;
Ptr<FlowMonitor> flowmon = flowmonHelper.Install (remoteHost);
p2ph.EnablePcap ("mazzoni", remoteHostContainer);

Simulator::Stop (Seconds (simTime));
Simulator::Run ();

for (int i = 0; i < serverApps.GetN (); i++)
{
    Ptr<PacketSink> sink = DynamicCast<PacketSink> (sinkApps.Get (i));
    std::cout << "Total Bytes Received: " << sink->GetTotalRx () << " KBytes/sec: "
        << (sink->GetTotalRx ()/1020)/(simTime-1) << std::endl;
}

flowmon->SerializeToXmlFile ("estadisticas.xml", false, false);
Simulator::Destroy ();
return 0;
}

```