

1ª EDIÇÃO

**CRISTIANO TELLES GINAR
FELIPE TAVARES RIBEIRO
BRUNO PEREIRA SOARES
RAFAEL GONZALEZ BASTOS
DIEGO COSTA LOPES
LEONEL GODINHO DA SILVA JUNIOR**

**ANÁLISE
FUNCIONAL DA
COBERTURA DE
REDES MÓVEIS
NA CIDADE DE
PELOTAS- RS**

**ISBN 978-65-00-41058-7
2022**

1ª EDIÇÃO

Cristiano Telles Ginar
Felipe Tavares Ribeiro
Bruno Pereira Soares
Rafael Gonzalez Bastos
Diego Costa Lopes
Leonel Godinho da Silva Junior

**ANÁLISE FUNCIONAL DA
COBERTURA DE REDES MÓVEIS
NA CIDADE DE PELOTAS- RS**

ISBN 978-65-00-41058-7

2022

 <http://periodicorease.pro.br/>

 contato@periodicorease.pro.br

 +55(11) 94920-0020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A532 Análise funcional da cobertura de redes móveis na cidade de Pelotas, RS / Cristiano Telles Ginar... [et al.]. – São Paulo, SP: Ed. do Autor, 2022.
108 p. : il.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-00-41058-7

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Sistema de comunicação móvel. 3. Sistema de telefonia celular. I. Ginar, Cristiano Telles. II. Ribeiro, Felipe Tavares. III. Soares, Bruno Pereira. IV. Bastos, Rafael Gonzalez. V. Lopes, Diego Costa. VI. Silva Junior, Leonel Godinho da.

CDD 384.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

1ª Edição - Copyright© 2022 dos autores.

Direito de Edição reservado à Revista REASE.

O conteúdo de cada capítulo é de inteira e exclusiva responsabilidade do(s) seu(s) respectivo(s) autor(es).

As normas ortográficas, questões gramaticais, sistema de citações e referencial bibliográfico são prerrogativas de cada autor(es).

Editora-Chefe Dra. Patrícia S. Ribeiro

Revisão Os autores

Projeto Gráfico Ana Cláudia Néri Bastos/ Talita Tainá Pereira Batista

Conselho Editorial Alfredo Oliveira Neto, UERJ, RJ

José Faijardo, Fundação Getúlio Vargas

Jussara C. dos Santos, Universidade do Minho

Maria Valeria Albardonado, Universidad Nacional del Comahue, Argentina

Uaiana Prates, Universidade de Lisboa, Portugal

José Benedito R. da Silva, UFSCar, SP

Pablo Guadarrama González, Universidad Central de Las Villas, Cuba

Maritza Montero, Universidad Central de Venezuela, Venezuela

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a minha esposa, Manoela Ginar, por todo carinho, amor e paciência a mim dedicados. Sem os quais certamente não teria concluído este trabalho. Agradeço aos meus amigos e colegas Márcio Telis e Michael Ropke, pelo apoio e companheirismo durante toda a graduação. Agradeço aos meus professores, Marcelo Rossi e Guilherme Paim, que me ajudaram a desenvolver este trabalho.

RESUMO

Em um contexto traçado desde o início da comunicação móvel até o momento atual com conteúdos digitais em altas velocidades nos dispositivos móveis, o presente trabalho fará uma abordagem geral da história e evolução dos sistemas de comunicações móveis, com um enfoque maior na tecnologia mais evoluída da quarta geração, o LTE (*Long Term Evolution*). Este trabalho aprofunda o conhecimento nessa tecnologia realizando simulações utilizando o *software* simulador de redes LTE *Link Level Simulator*, que será utilizado para obter características do comportamento da rede segundo parâmetros pré-definidos. Foram realizadas simulações em dois diferentes cenários, sendo que no primeiro se chegou o mais próximo possível de uma região urbana e densa no centro da cidade de Pelotas, na faixa de 20 MHz e na frequência de 2500 MHz. No segundo cenário foram propostas melhorias para o sistema utilizando femtocélulas, onde o objetivo foi buscar informações sobre o comportamento da rede em condições de sobrecarga devido à expansão do número de usuários conectados e falhas na cobertura oferecida. Considerando a análise do desempenho da rede em situações de sobrecarga foi constatada uma melhoria na capacidade do sistema com a utilização de femtocélulas. Dentre os parâmetros avaliados, observou-se um aumento médio de 1,22 Mb/s nas taxas de transferência média por usuário.

Palavras-chave: Cobertura. Qualidade. 4G. LTE.

ABSTRACT

In a survey from the beginning of the mobile communication until the present day, that demands high speed digital communications, this work shows an overall view about the mobile communication history and development highlighting the most advanced technology of the fourth generation, the LTE (Long Term Evolution). this work makes a deep investigation in the LTE technology with a network simulations using the "LTE Link Level Simulator". Through the "LTE Link Level Simulator" will be studied the network behavior characteristics using predefined parameters. The simulations were done to investigate two different situations. In the first one demonstrates the behavior of the highly populated Pelotas' downtown network, using a channel of 20 MHz bandwidth and a carrier of 2500 MHz. In the second one improvements to the system were proposed using femtocells with the objective to extract information about the network overloading due the increasing number of users and network coverage faults. Considering the analysis of the situation with network overload it was observed an improvement in system performance when using femtocells. Among the parameters evaluated, there was an increase of 1.22 Mb/s on average transfer rates per user.

Keywords: Coverage. Quality. LTE. 4G.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Gráfico com o número de conexões móveis por tecnologia | 19 |
| Figura 2 | Mapa dos países com LTE implantado ou planejando implantação.. | 20 |
| Figura 3 | Paisagem de uma rua na cidade de Nova York no ano de 1987 tomada por linhas telefônicas | 24 |
| Figura 4 | Fotografia da patente do <i>Wireless Telephone</i> registrada em 1904 pelo padre Roberto Landell de Moura..... | 27 |
| Figura 5 | Fotografia de um operador de rádio da polícia de Detroit | 28 |
| Figura 6 | Gráfico demonstrando o múltiplo acesso FDMA | 32 |
| Figura 7 | Gráfico demonstrando o múltiplo acesso TDMA | 33 |
| Figura 8 | Gráfico demonstrando o mutiplo acesso CDMA | 35 |
| Figura 9 | Figura demonstrando a evolução da família tecnológica do 3GPP. | 50 |
| Figura 10 | Evolução das redes móveis de comunicação | 51 |
| Figura 11 | Figura demonstrando os elementos da arquitetura LTE | 53 |
| Figura 12 | Arquitetura LTE com EUTRAN | 55 |
| Figura 13 | Gráfico da transmissão utilizando OFDMA comparado com SC-FDMA | 57 |
| Figura 14 | Sistema de acesso de múltiplas antenas | 59 |
| Figura 15 | Mapa da distribuição dos <i>eNodeBs</i> e usuários..... | 78 |
| Figura 16 | Mapa da propagação do sinal considerando apenas o efeito <i>fading</i> | 80 |
| Figura 17 | Mapa da propagação do sinal considerando o efeito <i>shadow fading</i> | 80 |
| Figura 18 | Gráfico do mapeamento do indicador de qualidade de canal dependendo do valor da relação sinal/ruído | 81 |
| Figura 19 | Gráfico da quantidade de usuários e taxa de transferência média do conjunto de células | 82 |
| Figura 20 | Mapa da cobertura da empresa Claro na cidade de Pelotas | 83 |
| Figura 21 | Mapa da cobertura da empresa Claro no centro da cidade de Pelotas | 84 |
| Figura 22 | Mapa do posicionamento do <i>eNodeBs</i> em Pelotas..... | 85 |
| Figura 23 | Mapa da região de estudos de onde sairão informações sobre a rede..... | 86 |
| Figura 24 | Mapa da cobertura gerada pelo simulador | 86 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 25 | Comparação entre o sinal simulado e o sinal disponibilizado pela Claro | 87 |
| Figura 26 | Gráfico demonstrando o comportamento da taxa de transferência média dos usuários de acordo com a quantidade de usuários presentes na região de interesse..... | 88 |
| Figura 27 | Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 2 Mb/s | 89 |
| Figura 28 | Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 4 Mb/s | 90 |
| Figura 29 | Gráfico demonstrando o comportamento das características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis pelo sistema | 91 |
| Figura 30 | Gráfico demonstrando o comportamento da taxa de transferência média dos usuários de acordo com a quantidade de usuários presentes na região de interesse de um sistema com femtocélulas..... | 94 |
| Figura 31 | Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com femtocélulas com parâmetro fixo em 2 Mb/s | 94 |
| Figura 32 | Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com femtocélulas com parâmetro fixo em 4 Mb/s | 95 |
| Figura 33 | Gráfico demonstrando as características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis em um sistema com femtocélulas | 95 |
| Figura 34 | Gráfico da comparação do comportamento de carga entre uma rede com e sem femtocélulas, analisando a taxa de transferência média dos usuários | 96 |
| Figura 35 | Gráfico da comparação entre sistemas com taxa de transferência superior a 2 Mb/s | 97 |
| Figura 36 | Gráfico da comparação entre sistemas com taxa de transferência superior a 4 Mb/s | 98 |
| Figura 37 | Gráfico demonstrando a comparação das características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis em um sistema com e sem femtocélulas | 99 |
| Figura 38 | Mapeamento e características do sinal 4G na cidade de Pelotas | 103 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 1 | Características do padrão AMPS | 36 |
| Tabela 2 | Tabela mostrando como as taxas de transferência de dados evoluíram, de acordo com as tecnologias que se sucederam ao longo do tempo | 52 |
| Tabela 3 | Modos de transmissão em downlink no LTE | 61 |
| Tabela 4 | Parâmetros de qualidade nas redes LTE | 63 |
| Tabela 5 | KPI's da categoria acessibilidade | 65 |
| Tabela 6 | KPI's da categoria integridade | 67 |
| Tabela 7 | KPI's da categoria mobilidade | 72 |
| Tabela 8 | KPI's da categoria retenção | 74 |
| Tabela 9 | KPI's da categoria disponibilidade | 75 |
| Tabela 10 | Tabela mostrando o comportamento do sistema conforme variação de usuários | 87 |
| Tabela 11 | Tabela mostrando o comportamento do sistema conforme variação de usuários em um cenário com femtocélulas | 93 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

| | |
|----------|---|
| AMPS | <i>Advanced Mobile Phone System</i> |
| ANATEL | Agência Nacional de Telecomunicaoes |
| ATT | <i>American Telephone Telegraph Company</i> |
| CDMA | <i>Code Division Multiple Access</i> |
| CKSN | <i>Ciphering Key Sequence Number</i> |
| E-UTRAN | <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> |
| EDGE | <i>Enhanced Data for GSM Evolution</i> |
| EIA | <i>Electronic Industries Alliance</i> |
| EM | Estaao Mvel |
| EPC | <i>Evolved Packet Core</i> |
| ERB | Estaao Rdio Base |
| ETSI | <i>European Telecommunication Standard Institute</i> |
| FDMA | <i>Frequency Division Multiple Access</i> |
| FCC | <i>Federal Communication Commission</i> |
| FM | <i>Frequency Modulation</i> |
| GBR | <i>Guaranteed Bit Rate</i> |
| GPRS | <i>General Packet Radio Service</i> |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications</i> |
| HSCSD | <i>High Speed Circuit Switched Data</i> |
| HSDPA | <i>High Speed Downlink Packet Access</i> |
| HSPA | <i>High Speed Packet Access</i> |
| HSUPA | <i>High Speed Uplink Packet Access</i> |
| IMT-2000 | <i>International Mobile Telecommunications-2000</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| IS-54 | <i>Interim Standard 54</i> |
| IS-95 | <i>Interim Standard 95</i> |
| IS-136 | <i>Interim Standard 136</i> |
| KPI | <i>Key Performance Indicators</i> |
| LTE | <i>Long Term Evolution</i> |
| MIMO | <i>Multiple Input Multiple Output</i> |

| | |
|---------|---|
| MISO | <i>Multiple Input Single Output</i> |
| MME | <i>Mobility Management Entity</i> |
| NMT | <i>Nordic Mobile Telecommunications</i> |
| OFDMA | <i>Ortogonal Frequency Division Multiple Access</i> |
| P-GW | <i>Packet Data Network Gateway</i> |
| QCI | <i>QoS Class Identifier</i> |
| QoS | <i>Quality of service</i> |
| RF | <i>Radio Frequency</i> |
| SAE | <i>System Architecture Evolution</i> |
| SC-FDMA | <i>Single Carrier - Frequency Division Multiple Access</i> |
| S-GW | <i>Serving Gateway</i> |
| SIM | <i>Subscriber Identify Module</i> |
| SIMO | <i>Single Input Multiple Output</i> |
| SISO | <i>Single Input Single Output</i> |
| SMS | <i>Short Message Service</i> |
| SNR | <i>Signal Noise Ratio</i> |
| TACS | <i>Total Acess Communications System</i> |
| TCP/IP | <i>Transmission Control Protocol/ Internet Protocol</i> |
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> |
| TIA | <i>Telecommunication International Association</i> |
| TMSI | <i>Temporary Mobile Subscriber Identity</i> |
| UE | <i>User Equipament</i> |
| UHF | <i>Ultra High Frequency</i> |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> |
| UTRA | <i>Universal Terrestrial Radio Access</i> |
| WCDMA | <i>Wide Band Code Division Multiple Access</i> |
| 1G | <i>Primeira Geração</i> |
| 2G | <i>Segunda Geração</i> |
| 2,5G | <i>Geração intermediária entre Segunda e Terceira Geração</i> |
| 3G | <i>Terceira Geração</i> |
| 3,5G | <i>Geração Intermediária entre Terceira e Quarta Geração</i> |
| 4G | <i>Quarta Geração</i> |
| 3GPP | <i>Third Generation Partnership Project</i> |

SUMARIO

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 17 |
| 1.1 Motivação | 19 |
| 1.2 Objetivos | 21 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho | 22 |
| 2 Histórico e Evolução da Comunicação Móvel | 24 |
| 2.1 Histórico | 24 |
| 2.2 Técnicas de Múltiplo Acesso | 31 |
| 2.2.1 FDMA | 32 |
| 2.2.2 TDMA | 33 |
| 2.2.3 CDMA | 34 |
| 2.3 Primeira geração da comunicação móvel – 1G | 35 |
| 2.4 Segunda geração da comunicação móvel – 2G | 37 |
| 2.4.1 Padrão IS-54 | 39 |
| 2.4.2 Padrão IS-95 | 39 |
| 2.4.3 Padrão IS-136 | 40 |
| 2.4.4 GSM | 41 |
| 2.5 Gerações Intermediárias – 2,5G | 42 |
| 2.5.1 HSCSD | 43 |
| 2.5.2 GPRS | 43 |
| 2.5.3 EDGE | 44 |
| 2.5.4 IS-95B | 45 |
| 2.6 Terceira geração da comunicação móvel – 3G | 45 |
| 2.6.1 UMTS | 46 |
| 2.6.2 CDMA2000 | 47 |
| 2.7 Gerações Intermediárias – 3,5G | 48 |
| 2.7.1 HSPA | 48 |
| 2.7.2 HSPA+ | 49 |
| 2.8 Quarta geração da comunicação móvel – 4G | 50 |
| 3 Fundamentos do LTE | 53 |
| 3.1 Arquitetura do LTE | 53 |
| 3.2 Interface aérea | 57 |
| 3.3 Técnicas de múltiplas antenas | 58 |

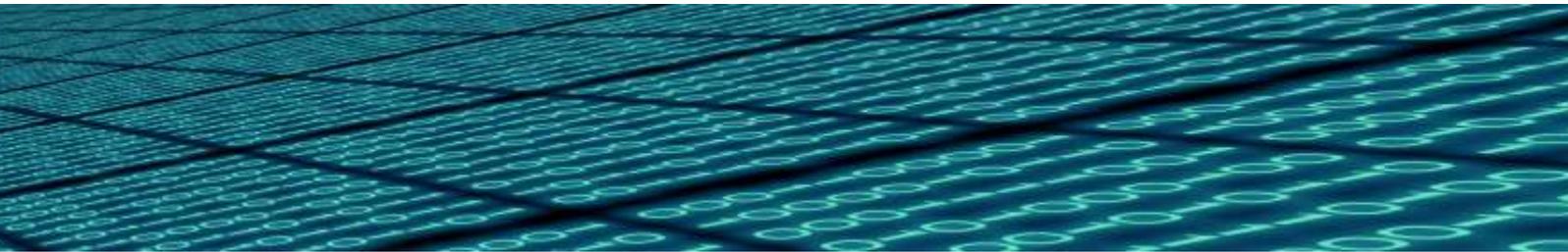
| | |
|--|-----|
| 3.3.1 <i>Single Input Single Output (SISO)</i> | 59 |
| 3.3.2 <i>Single Input Multiple Output (SIMO)</i> | 60 |
| 3.3.3 <i>Multiple Input Single Output (MISO)</i> | 60 |
| 3.3.4 <i>Multiple Input Multiple Output (MIMO)</i> | 60 |
| 4 Indicadores de Qualidade | 63 |
| 4.1 Qualidade de serviço (QoS) | 63 |
| 4.2 <i>Key Performance Indicators (KPI's)</i> | 64 |
| 4.2.1 Acessibilidade | 65 |
| 4.2.2 Integridade | 66 |
| 4.2.3 Mobilidade | 71 |
| 4.2.4 Retenção | 74 |
| 4.2.5 Disponibilidade | 75 |
| 5. Procedimento Experimental | 77 |
| 5.1 Introdução ao Simulador | 77 |
| 5.2 Simulação do estudo de caso | 82 |
| 5.2.1 Sistema com acréscimo de femtocélulas | 92 |
| 5.2.2 Comparação entre as simulações | 96 |
| 6 Conclusões e trabalhos futuros | 101 |
| Referências | 104 |

INTRODUÇÃO

A comunicação móvel teve mudanças tão grandes no que diz respeito à sua funcionalidade, que algumas funções atuais eram inimagináveis há alguns anos. Um fato expressivo da comunicação móvel se deu com o padre Roberto Landell de Moura em Porto Alegre/RS, quando o mesmo conseguiu transmitir voz humana por ondas de rádio.

Já na fase comercial a primeira geração da comunicação móvel apresentava diversos problemas, além de ser analógica. Isso foi aprimorado na segunda geração, onde foram implementadas diversas melhorias, dentre elas a inclusão do sinal digital, proporcionando maior confiabilidade para os usuários. Ainda na segunda geração surgiu o SMS (*Short Message Service*), um serviço ainda bastante utilizado. O processo evolutivo continuou rapidamente com a terceira geração, possuindo uma cobertura maior e uma largura de banda mais ampla, de forma que esse padrão permitiu o desenvolvimento de novos serviços, abrindo uma gama maior de possibilidades.

A busca por maiores taxas de transmissão aumenta cada vez mais em função de novos aplicativos e funcionalidades que demandam uma maior banda para os novos serviços. Com isto, surgem novas tecnologias que proporcionam melhores serviços e diversidade de possíveis aplicações. Tendo em vista que a



demanda por um fluxo de informações se torna cada vez maior, isso faz com que empresas do ramo de telecomunicações desenvolvam novas soluções que satisfaçam esta demanda. Nos dias de hoje, ainda em implementação, a quarta geração de comunicação móvel, o 4G, baseia-se na transferência de dados via IP (*Internet Protocol*), com taxas de dados superiores às tecnologias antecessoras.

Das tecnologias 4G, a que mais se destaca em nível mundial é a LTE (*Long Term Evolution*). A maior adoção dessa tecnologia está relacionada, principalmente, a melhorias como: aumento de eficiência espectral, maior capacidade de rede, diminuição da latência, infraestruturas mais baratas e aumento da qualidade dos serviços.

Com o constante aumento do número de usuários que utilizam a comunicação móvel surgem alguns problemas. Dentre eles, a cobertura e a qualidade dos serviços oferecidos pelas operadoras em regiões urbanas mais densas. Isto ocorre pois o crescimento do número de usuários tem imposto, cada vez mais, novos desafios a tecnologia LTE, exigindo mudanças técnicas e legislativas para o setor.

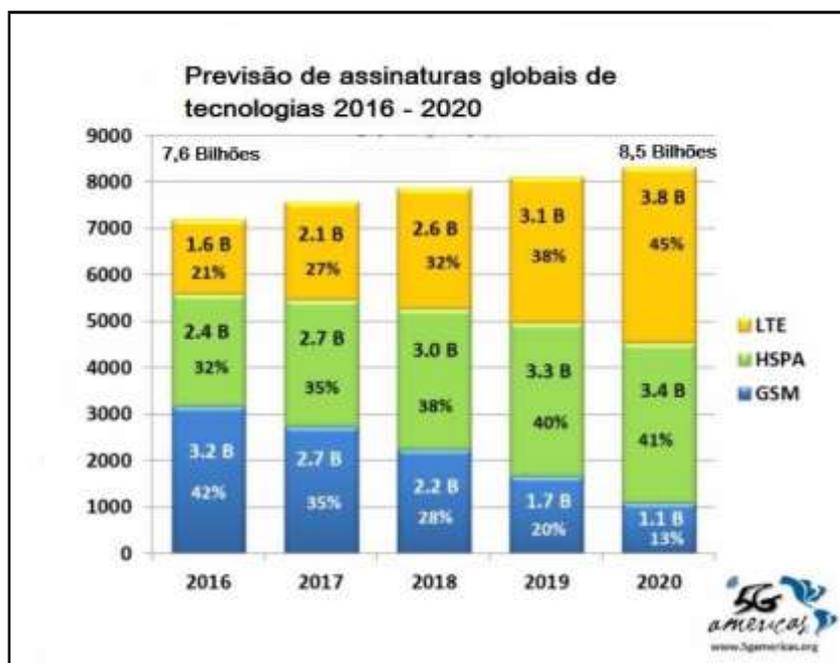
Em 2012 a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) realizou o primeiro leilão de frequências de 2500 MHz para implementação do 4G no Brasil, e algum tempo depois ficou estabelecido que o padrão utilizado seria o LTE, sendo implantado na cidade de Pelotas em outubro de 2014 (ANATEL, 2015).

1.1 Motivação

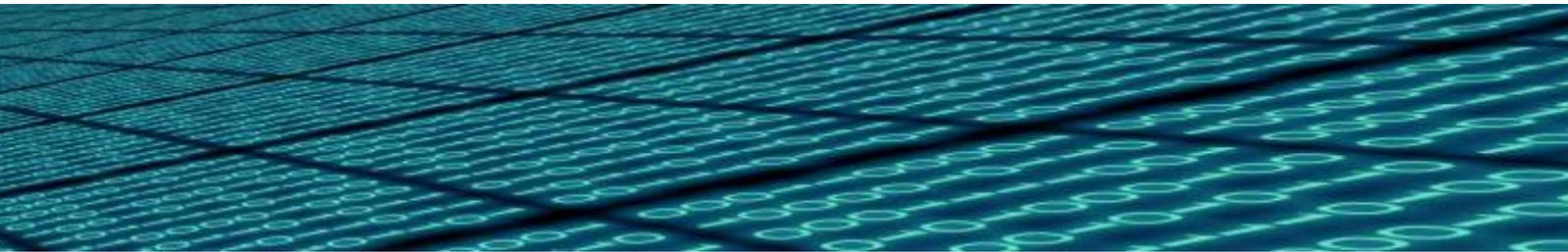
Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Pelotas possui pouco mais de 340 mil habitantes e, de acordo com a ANATEL, a região de Pelotas é a terceira com maior acesso móvel por habitante no Brasil, sendo sua densidade igual a 158,57 acessos a cada 100 habitantes (dados de março de 2016).

O número de conexões móveis já ultrapassava, em 2015, o número de seres humanos. Em 2016 o número de conexões móveis mundiais passará a ser de 7,6 bilhões, sendo que 1,6 bilhões serão de conexões na rede LTE, conforme mostrado na Figura 1 (5GAMÉRICAS, 2016).

Figura 1 – Gráfico com o número de conexões móveis por tecnologia.



Fonte: 5GAMÉRICAS, 2016.



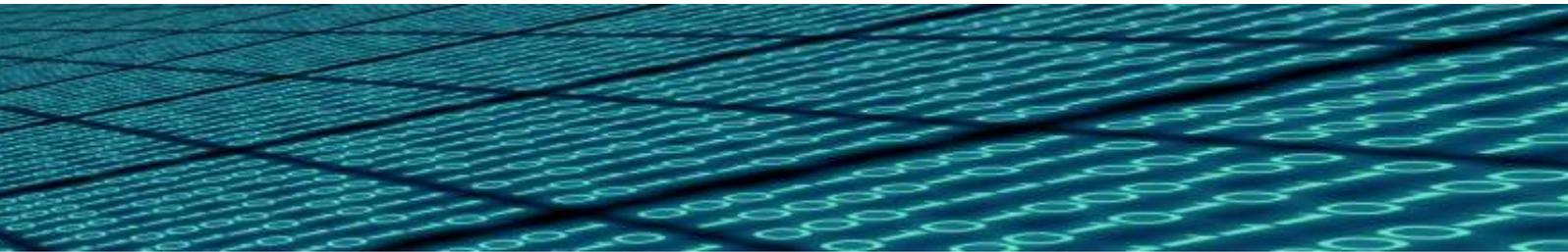
através da grande a expansão das redes de comunicações e da utilização de dispositivos móveis e portáteis. Desta forma, a confiança dos usuários em redes móveis tem aumentado cada vez mais e, conseqüentemente, a exigência por melhores serviços também.

Visualizada a crescente demanda de comunicação móvel e o surgimento da nova tecnologia de troca de dados, surge a pergunta: como está a cidade de Pelotas diante destes avanços na área de comunicação? Assim, a motivação para este trabalho está em realizar uma investigação da estrutura da plataforma 4G na cidade de Pelotas.

1.2 Objetivos

Levando em consideração a implantação das redes 4G na cidade de Pelotas e tendo em vista o aumento da demanda por qualidade de conexão e cobertura das redes 4G, este trabalho tem por objetivo a avaliação da qualidade e do desempenho da cobertura celular da empresa Claro no centro da cidade de Pelotas. Para isto, serão feitas buscas de informações juntamente às operadoras de telecomunicações atuantes na cidade e simulações da situação atual de forma a prever possíveis melhorias na estrutura das redes LTE de Pelotas.

Para as simulações serão propostos dois cenários. No primeiro tentará se chegar o mais próximo possível de uma região de aproximadamente 4km² urbana e densa. Para o segundo cenário serão propostas soluções para a melhoria do



desempenho da rede em situações de falta de qualidade de sinal e cobertura.

Outro objetivo é demonstrar como as gerações das rede móveis evoluíram a partir de um histórico das gerações anteriores até a quarta geração.

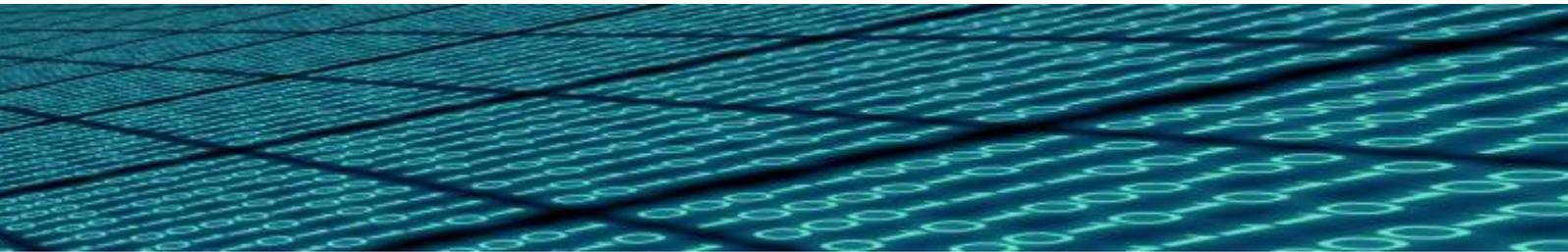
1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos, este primeiro é o capítulo onde são apresentados: a introdução, contendo a motivação que descreve a relevância do trabalho escolhido, mostrando a importância de se estudar o sistema móvel e entender o seu comportamento sob grande demanda de serviços; os objetivos são demonstrados enfatizando os resultados esperados no final do trabalho, onde se espera propor soluções que melhorem a capacidade do sistema móvel na cidade de Pelotas.

No capítulo 2 será demonstrado como as redes móveis de comunicação vem evoluindo a partir de um breve histórico das gerações anteriores até a quarta geração e como cada uma delas impactou a sociedade da sua época.

Em seguida, no capítulo 3, haverá uma discussão teórica dos conceitos da mais significativa tecnologia 4G no mundo, a LTE.

No capítulo 4 são apresentados os conceitos de QoS (*Quality of service*) e *KPI's (Key Performance Indicators)*, parâmetros essenciais utilizados no planejamento de rede em



sistemas de telecomunicação que permitem verificar a qualidade da rede móvel.

No capítulo 5 inicia-se a parte experimental do trabalho, sendo feita uma apresentação do simulador utilizado, mostrando como se deu o entendimento do mesmo e a avaliação de quais dados gerados pelo simulador seriam relevantes para o trabalho. Em seguida se tem a simulação e coleta de dados para os dois cenários definidos no trabalho, um sistema com femtocélulas e outro sem. Realiza-se a comparação entre as informações obtidas e avalia-se qual o efeito gerado quando se insere femtocélulas no sistema de telefonia móvel.

No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões, assim como as sugestões de trabalhos futuros.

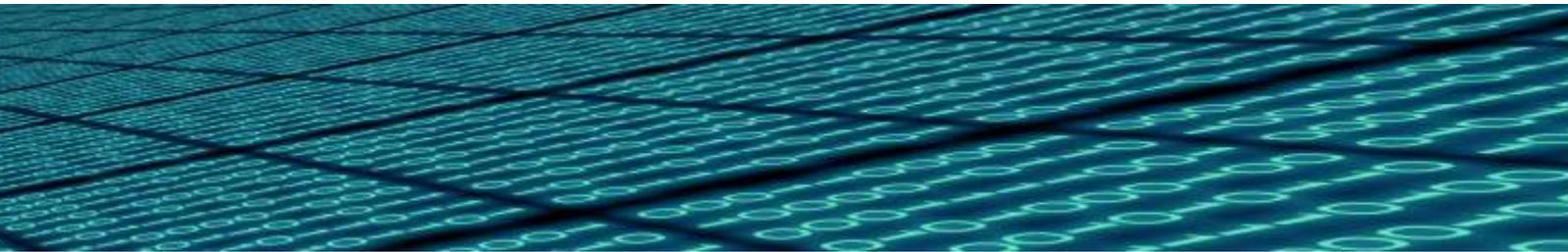
2 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DA COMUNICAÇÃO MÓVEL

2.1 Histórico

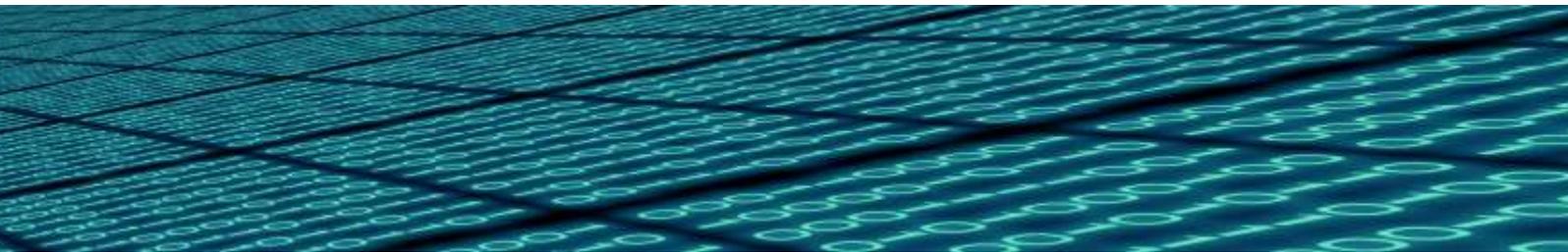
O início das comunicações se deu em 1876, com Alexander Graham Bell com experimentos em transmissão de voz através de sinais elétricos. Nos seus experimentos, Graham Bell utilizava um microfone de carbono com um resistor variável, no qual a vibração da voz modulava a corrente elétrica que passava por ele. Essa corrente modulada era, então, levada a um alto-falante e, assim, a voz podia ser ouvida em um local distante ao do microfone. Logo após a divulgação da invenção à sociedade, esse equipamento tornou-se objeto de cobiça e desejo da população. O grande desejo por esse sistema de comunicação e a precariedade da tecnologia da época acabaram poluindo as paisagens de várias cidades, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Fotografia de uma rua na cidade de Nova York tomada por linhas telefônicas.





Para atender o desejo de comunicação da população Alexander Graham Bell fundou, então, sua empresa de telecomunicações, a *Bell Telephone Company*. Ao longo dos anos a empresa de Graham Bell foi absorvendo empresas do ramo e também sendo absorvida por outras, até se transformar na *American Telephone Telegraph Company* (AT&T), atualmente a maior empresa de telecomunicações do mundo.



Enquanto a comunidade ansiava em utilizar os produtos e serviços criados pelas empresas de Graham Bell, outros pesquisadores buscavam modos de comunicação que independiam da utilização de condutores. No período de 1886 a 1888 Heinrich Rudolf Hertz realizou uma série de experimentos na tentativa de comprovar experimentalmente as equações de Maxwell, que são as equações que compõem a base do eletromagnetismo clássico no qual está embebida toda a teoria que demonstra a existência das ondas eletromagnéticas. Os resultados do trabalho de Hertz demonstraram a possibilidade de transmitir ondas eletromagnéticas (ondas de rádio) e detectá-las em um outro local na forma de uma faísca. Isto levou ao início dos estudos do rádio. A primeira utilização importante da comunicação por rádio foi realizada em 1897, quando Guilherme Marconi fez várias transmissões de rádio de uma ilha para um navio que estava a 18 milhas da costa. O trabalho de Marconi foi o primeiro que permitiu a comunicação utilizando ondas de rádio. Entretanto, o seu sistema só permitia transmitir código *Morse* para a comunicação. O grande avanço no sistema de comunicação veio em 1900 quando Roberto Landell de Moura, um padre brasileiro natural de Porto Alegre/RS, foi capaz de transmitir a voz humana pelo rádio. Com o sucesso de seu trabalho, o padre Landell conseguiu patentear diversos produtos que permitiam a comunicação utilizando ondas de rádio. A sua patente de número 775.337,

registrada no dia 22/11/1904 em Nova York, descreve um dispositivo nomeado como *Wireless Telephone* (telefone sem fio), um rádio primitivo elaborado para substituir o produto criado por Graham Bell. O Memorial Landell de Moura, em Porto Alegre/RS, possui em seu acervo as patentes registradas por esse padre brasileiro, inclusive a patente do *Wireless Telephone*. A Figura 4 apresenta a cópia da patente do *Wireless Telephone*.

Figura 4 – Fotografia da patente do *Wireless Telephone* registrada em 1904 pelo padre Roberto Landell de Moura.



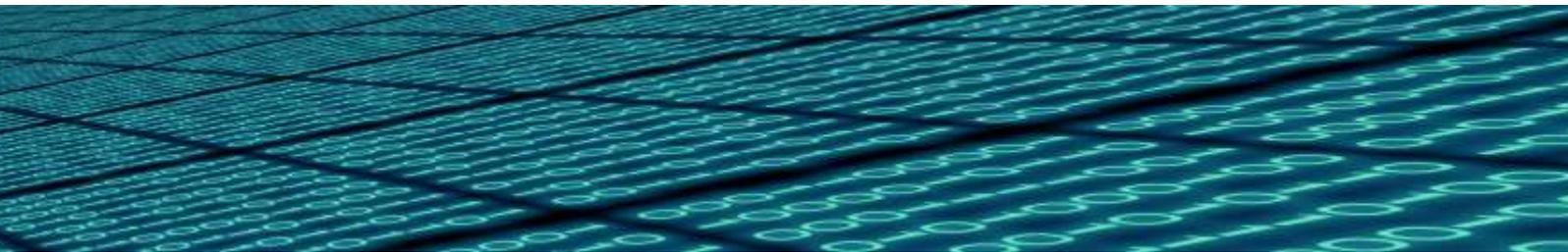
Segundo Haykin e Moher (2008), em 1921, na cidade de Detroit, nos Estados Unidos, a polícia utilizava o rádio em viaturas móveis para se manter em contato constante com a central, e os equipamentos baseavam-se na tecnologia *half-duplex*, ou seja, utilizavam equipamentos que operavam na mesma frequência, sendo que apenas uma pessoa podia ser o transmissor por vez. Esses rádios operavam na faixa de 2 MHz com uma potência bastante reduzida e apresentavam grande quantidade de interferências.

Figura 5 – Fotografia de um operador de rádio da polícia de Detroit.



Fonte: TECMUNDO, (2009).

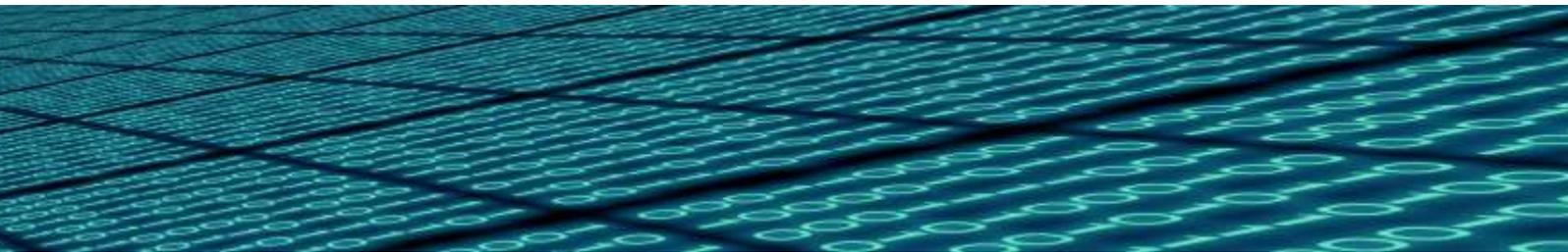
Aykin e Moher (2008) descreveram que com o constante avanço da tecnologia, a tendência era que as frequências de operação fossem elevadas. A FCC (*Federal Communication Commission*), órgão que regulamentava o setor nos Estados Unidos, autorizou em 1935 a utilização de quatro canais na faixa de 30 MHz a 40 MHz, de forma experimental, vindo a



regularizar seu uso em 1938. Abreu (2002) explica que um pouco antes da Segunda Guerra Mundial surgiram as técnicas de espalhamento espectral (*spread spectrum*) com fins estritamente militares, tendo as pesquisas intensificadas durante o período de guerra. Particularmente haviam duas motivações para as pesquisas: codificação e otimização de faixa de frequência.

Em 1946, com o avanço tecnológico, começaram a surgir os primeiros sistemas de telefonia móvel fornecidos ao público. Com isso, a empresa Bell Company, em 1947, desenvolveu um sistema que permitia a utilização de telefonia móvel dentro de uma determinada área utilizando o conceito de células ou áreas de cobertura, derivando deste, o nome celular. Ainda naquele ano, nos Estados Unidos, a AT&T e a Bell propuseram à FCC a alocação de um número de frequência de rádio especificamente para comunicação móvel. Entretanto a FCC disponibilizou apenas poucas frequências, possibilitando que somente 23 pessoas se conectassem simultaneamente ao sistema de uma determinada área de cobertura (SANTOS, 2016).

Segundo Tude *et al* (2012), em 1955, foi implementada a seleção automática de canais vagos pelos equipamentos de rádios móveis, utilizando novas técnicas de projeto e fabricação de filtros, e com isso, foi possível a redução do espaçamento entre canais de 60 KHz para 30 KHz. Isso permitiu que um total de 11 canais pudessem ser utilizados na faixa de 150 MHz.



Em 1964, foi desenvolvido um novo sistema, denominado sistema MJ, que utilizava a tecnologia *full-duplex*, onde cada usuário podia ser transmissor e receptor ao mesmo tempo. Este sistema tinha como objetivos a melhoria da eficiência, redução de custos e fazer otimização dos poucos canais existentes. O mesmo operava em 150 MHz, e permitia a seleção automática do canal vago para cada chamada, possibilitando que os próprios usuários fizessem a discagem do número desejado, tornando o sistema independente de telefonistas.

Logo a seguir, em 1956, o FCC autorizou 12 canais na faixa de 450 MHz, permitindo que em 1969 surgisse outro sistema automático na faixa de 450 MHz, conhecido como MK, que também era *full-duplex* e incorporava os refinamentos introduzidos no MJ. Mesmo com o sistema operando de forma ineficiente, havia uma grande quantidade de usuários na espera para se habilitar ao sistema, indicando uma alta procura pelo serviço. Isso forçou a FCC, em 1975, a alocar mais 40 MHz e a reservar mais 20 MHz, na faixa de 800 MHz para o sistema celular.

Alguns anos depois as empresas ATT e Bell definiram o sistema de uso de torres para atender aos usuários por áreas, conforme seu deslocamento, e, desta forma, continuou a propagação do sistema até a cobertura atingida nos dias atuais (SANTOS, 2016).

2.2 Técnicas de Múltiplo Acesso

Com objetivo do melhor uso de espectro disponível aos serviços de comunicações móveis, surgiram técnicas capazes de permitir que vários usuários acessassem o meio de transmissão, compartilhando canais de rádio. (RAPPAPORT,2009).

Takeda (2013) explica que o acesso múltiplo (*multiple access*) é a capacidade de uma tecnologia conseguir processar na mesma faixa de frequência inúmeras chamadas.

No sistema celular os usuários originam e recebem chamadas utilizando a mesma faixa de frequência.

Existem basicamente três tecnologias de acesso múltiplo, diferenciadas pela manipulação adequada de frequência, tempo e código.

O FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), caracterizado principalmente pela alocação de diferentes faixas do espectro para os canais de voz. O TDMA (*Time Division Multiple Access*) que utiliza janelas de tempos diferentes em um mesmo canal para processar as informações de diferentes usuários. O CDMA (*Code Division Multiple Access*), que utiliza uma técnica conhecida como espalhamento espectral (*spread spectrum*), consistindo na atribuição de um código de acesso de transmissão diferente para cada usuário, com o objetivo de reduzir as interferências e aumentar a privacidade das informações contidas.

A seguir as técnicas de múltiplo acesso serão especificadas conforme Rappaport (2009); Haykin e Moher (2009); Dahlman *et al* (2010) e Fiorese (2005).

2.2.1 FDMA

Nesta técnica de acesso, o espectro é dividido em canais e uma portadora é designada para cada usuário, o número de canais no sistema será função da largura de cada canal. Uma porção dos canais disponíveis é reservada aos canais de controle, sendo que a maior parte dos canais é dedicada ao tráfego de voz. Neste esquema, divide-se inicialmente o espectro disponível por faixas de serviços, e dentro de cada serviço é necessário garantir que os diferentes usuários não provocarão interferência uns nos outros. Isto pode ser alcançado através da separação geográfica dos usuários ou canalização adequada, diferindo cada usuário pela sua faixa de frequências específica. Desta forma, no FDMA o acesso ao meio é realizado pela divisão sucessiva de faixas de frequências, conforme mostrado na Figura 6, onde somente um usuário pode utilizar o canal a cada momento e em um determinado local.

Figura 6 – Gráfico demonstrando o múltiplo acesso FDMA



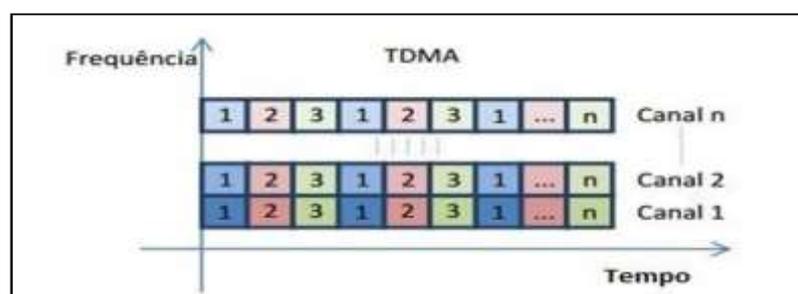
2.2.2 TDMA

O TDMA é uma técnica de acesso onde cada canal de frequência é dividido em intervalos de tempo chamados *slots*. A cada intervalo de tempo, somente um usuário pode usar o canal. O usuário, portanto, transmite ou recebe em um intervalo de tempo e aguarda até que seja disponibilizado a ele um novo intervalo, quando se completa o ciclo. Este fato tem como consequência principal que uma vez que não há uma transmissão ou recepção contínua, descarta-se completamente a modulação analógica, fazendo-se necessária uma modulação digital.

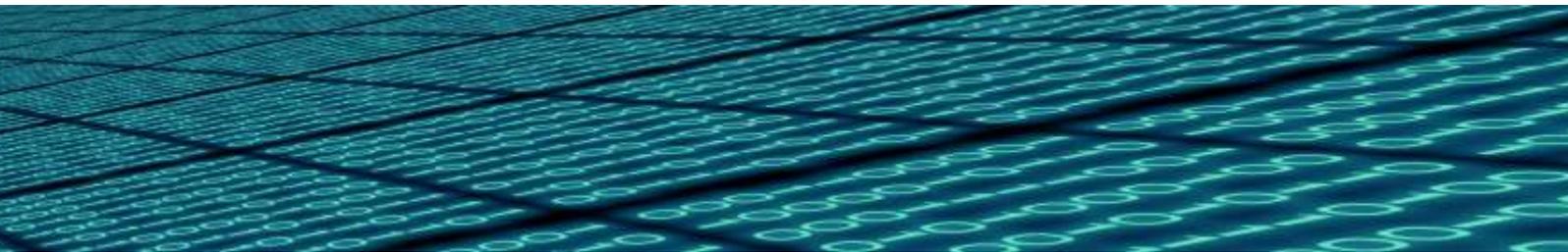
O intervalo de tempo entre uma transmissão (recepção) e outra deve ser suficiente para realizar a amostragem do sinal, todas as codificações (decodificações) e entrelaçamento dos dados.

Para cada faixa de frequência, o conjunto total de *slots* define um quadro do TDMA, chamado *frame*. Portanto, o tempo total do *frame* dividido em *slots* menores, definem o canal TDMA.

Figura 7 – Gráfico demonstrando o múltiplo acesso TDMA.



Fonte: ROCHA, 2008.



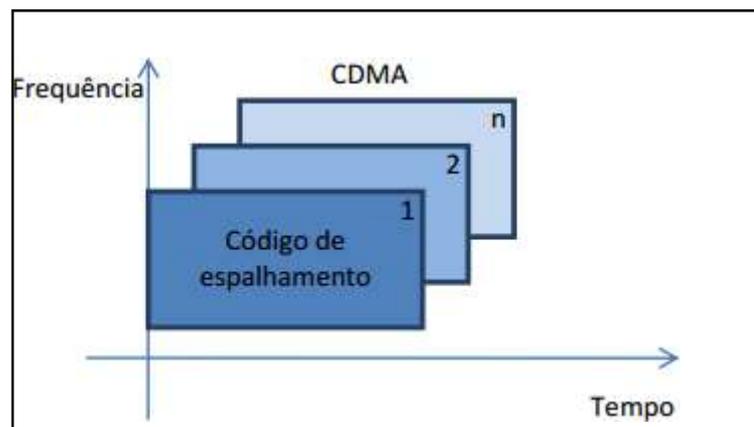
Conforme observa-se na Figura 7, em uma única faixa de frequências podem ser inseridos vários usuários, o que permite melhorar a capacidade do sistema.

2.2.3 CDMA

A tecnologia CDMA tem sua origem no seguimento militar dos Estados Unidos, sendo utilizada inicialmente para comunicação entre aviões de caça e rádio controle de mísseis teleguiados.

Esta tecnologia utiliza uma técnica conhecida como espalhamento espectral (*spread spectrum*). Sistemas de comunicação com espalhamento espectral são sistemas onde a banda do sinal transmitido é muito maior do que a banda do sinal informação, com o objetivo de diminuir interferências intencionais ou não intencionais ao sistema de comunicação. Este aumento de banda do sinal informação é denominado espalhamento e é realizado através de um código de sequência de *bits* independente da sequência de informação. Esta sequência de *bits* é pseudoaleatória, ou seja, é conhecida pelo receptor de interesse, enquanto simula ser aleatória para os receptores não desejados e estas sequências aleatórias são chamadas de *pseudo noise*. A Figura 8 representa um sistema CDMA, onde cada conversa tem um código de espalhamento diferente, mas todas estão dentro da mesma faixa de frequência.

Figura 8 – Gráfico demonstrando o múltiplo acesso CDMA.



Fonte: ROCHA, 2008.

2.3 Primeira geração da comunicação móvel – 1G

A primeira geração de sistemas celulares, chamada 1G, representou um grande impacto na sociedade por se tratar de um sistema sem fio. Até então, segundo Takeda (2013), todos os sistemas eram centralizados e, como consequência, tinham baixa capacidade de tráfego e alto custo. Estas características restringiam a poucos usuários a possibilidade de se comunicar em movimento com um serviço de telefonia.

Os sistemas de primeira geração eram analógicos, utilizavam sistemas de modulação em frequência (*Frequency Modulation - FM*), onde o usuário tinha a voz transmitida em radiofrequência (*Radio Frequency – RF*) na faixa UHF (*Ultra High Frequency*).

Porém, segundo Dahlman *et al* (2010) e Takeda (2013), se tratava de um sistema novo, no qual pouco se sabia sobre suas

tendências de mercado e potencial. Visando uma padronização nos sistemas, a empresa Bell Labs em 1979 criou o padrão AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), que utiliza a tecnologia FDMA, com largura de banda de 30 KHz por canal, sendo que cada banda ocupa 12,5 MHz, composta por 416 canais, totalizando 21 canais de controle e 395 canais de voz.

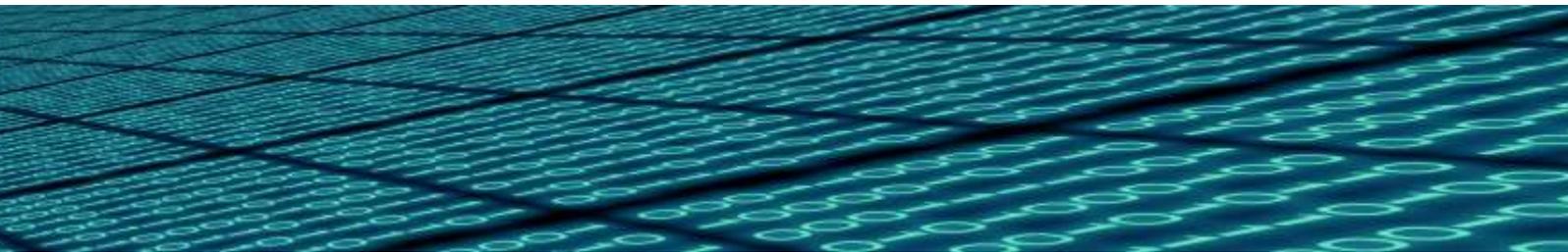
Na Tabela 1 Sverzut (2005) descreve algumas características do padrão AMPS.

Tabela 1 - Características do padrão AMPS.

| | |
|---|------------------------|
| Tecnologia de múltiplo acesso | FDMA |
| Largura do canal | 30 KHz |
| Usuários por canal | 1 |
| Faixa de frequência do enlace direto | 869 – 894 MHz |
| Faixa de frequência do enlace reverso | 824 – 849 MHz |
| Largura de banda disponível | 25 MHz (894 – 869 MHz) |
| Espaçamento entre os canais de enlaces reversos e diretos | 45 MHz |
| Modulação do sinal de voz | FM |
| Numero de canais | 832 |

Fonte: SVERZUT, 2005.

Na Europa, diferentes sistemas compunham a primeira geração de sistemas de celulares. O TACS (*Total Access Communications System*), adotado no Reino Unido, Itália, Áustria, Espanha e Irlanda; o C-450 na Alemanha e Portugal; o Radiocom 2000 na França; e o NMT (*Nordic Mobile*



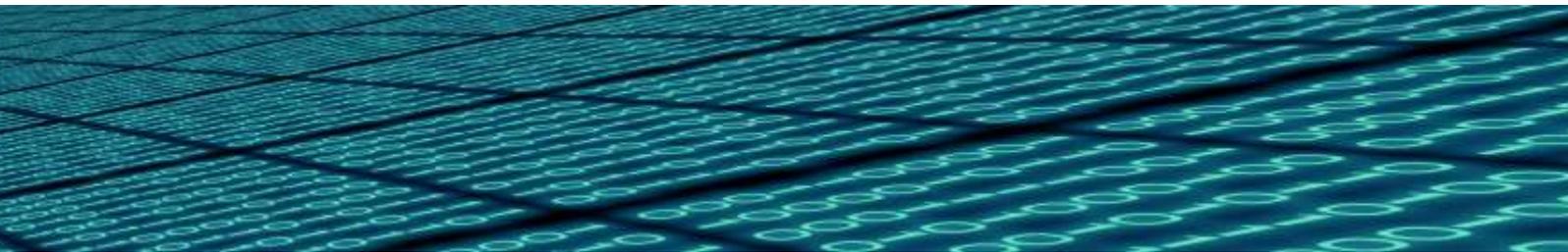
Telecommunications), adotado por alguns outros países. Estes sistemas são bastante parecidos, uma vez que as principais diferenças estão no uso do espectro de frequência e no espaçamento entre canais (DAHLMAN *et al*, 2010).

2.4 Segunda geração da comunicação móvel – 2G

Os sistemas móveis de segunda geração, chamados 2G, apareceram por volta de 1980 com a finalidade de resolver as limitações dos sistemas móveis de comunicação da primeira geração que haviam sido, ainda assim, um sucesso comercial, o que contribuiu igualmente para o aparecimento das redes móveis de segunda geração. (FERNANDES; CARVALHO, 2014).

Rappaport (2009) explica que para a segunda geração foram melhorados aspectos técnicos, comerciais e políticas de normalização das redes móveis. Foi também nesta geração que o celular começou a ser mais acessível monetariamente, o que contribuiu para que as pessoas tivessem uma grande adesão ao serviço de telefonia móvel. Enquanto a primeira chamada de telefone celular digital foi feita nos Estados Unidos em 1990, foi na Finlândia, em 1991, que a primeira rede GSM (*Global System for Mobile Communications*) foi instalada. Rede esta que iria ser a tecnologia móvel 2G mais popular.

O seu desenvolvimento surgiu da necessidade de haver um maior número de ligações simultâneas permitindo, então, que



mais pessoas pudessem se comunicar ao mesmo tempo e sem provocar o congestionamento da rede.

Para isto, Rappaport (2009) descreve que foram introduzidos, então, protocolos de telefonia digital que, além de permitirem mais conexões simultâneas com a mesma largura de banda, permitiam integrar outros serviços. Esses serviços de dados forneceram à rede celular a capacidade para transmissão de dados entre dispositivos de fax e modem.

Sverzut (2005) elucida que a principal e mais significativa melhoria nesta nova geração é o aumento de sua capacidade, suprimindo as necessidades dos Estados Unidos e a sua uniformização que supriu as necessidades Europeias, saindo dos sistemas analógicos e possibilitando a tecnologia digital. Três novos padrões de comunicação foram criados nos Estados Unidos, o padrão IS-54 (AMPS digital ou D-AMPS), o padrão IS-136, conhecido através da tecnologia TDMA e o padrão IS-95, também muito conhecido através da tecnologia CDMA. Já na Europa, com a necessidade e esforços de uniformização, foi criado o GSM.

Com as seguidas evoluções, e juntamente com a segunda geração de comunicação móvel, Dahlman *et al* (2010) explica o surgimento da oportunidade de oferecer serviços de dados através de redes de comunicações móveis. A mensagem de texto foi o primeiro serviço de dados utilizado na tecnologia 2G e circuitos chaveados de dados que permitiram a utilização de *e-mail*.

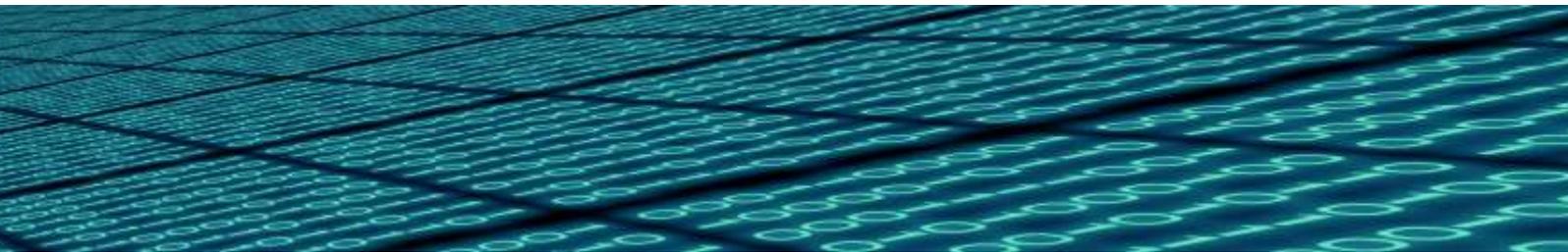
2.4.1 Padrão IS-54

Com a demanda crescendo cada vez mais e a necessidade de se aumentar as áreas de cobertura das operadoras foi adotado em 1980 o padrão IS-54 (*Interim Standard 54*), também conhecido como AMPS Digital, baseado no AMPS, este padrão foi criado para que houvesse uma transição suave entre a primeira e a segunda geração (TUDE *et al*, 2012).

O IS-54 inclui fatores tais como identificação de chamada, identificador de mensagem em espera, autenticação, privacidade de voz e uma melhoria da capacidade da ordem de três vezes em relação aos sistemas analógicos. Um fato a ser observado é a manutenção da faixa de 30 KHz do FDMA, de forma a também realizar uma transição suave dos sistemas AMPS para IS-54.

2.4.2 Padrão IS-95

Rappaport (2009) descreve que o padrão IS-95 é um padrão celular baseado na técnica de acesso CDMA e que prometia uma capacidade aumentada. Este padrão foi projetado para ser compatível com a banda de frequência do sistema analógico existente nos Estados Unidos, o sistema AMPS. O IS-95 permite que um mesmo canal de rádio seja utilizado por cada usuário, e usuários em células adjacentes usem o mesmo canal de rádio, uma vez que é um sistema CDMA de difusão espectral com sequência direta, onde o sinal de informação é multiplicado por um sinal codificador denominado de *pseudo*



noise. O planejamento de frequências dentro de um mercado é completamente eliminado pelo CDMA. Cada canal do IS-95 ocupa 1,25 MHz dentro do espectro, para que se tenha uma transição suave do AMPS para o IS-95.

Uma das características que diferencia este padrão dos outros padrões celulares é que a taxa de dados do usuário muda em tempo real, dependendo da atividade da voz e dos requisitos na rede.

2.4.3 Padrão IS-136

Devido ao constante aumento na necessidade da capacidade dos sistemas celulares, a EIA (*Electronic Industries Alliance*) e a TIA (*Telecommunication International Association*) viram a necessidade de se desenvolver um novo padrão de comunicação.

Cornélio (2011) sustenta que em cerca de dez anos os sistemas analógicos já haviam sido totalmente substituídos por sistemas digitais, e um dos padrões que foi implementado foi o IS-136, sendo que as principais motivações para sua implementação foram a compatibilidade com a largura de faixa do IS-54 e AMPS, bem como o aumento da capacidade e desempenho do sistema.

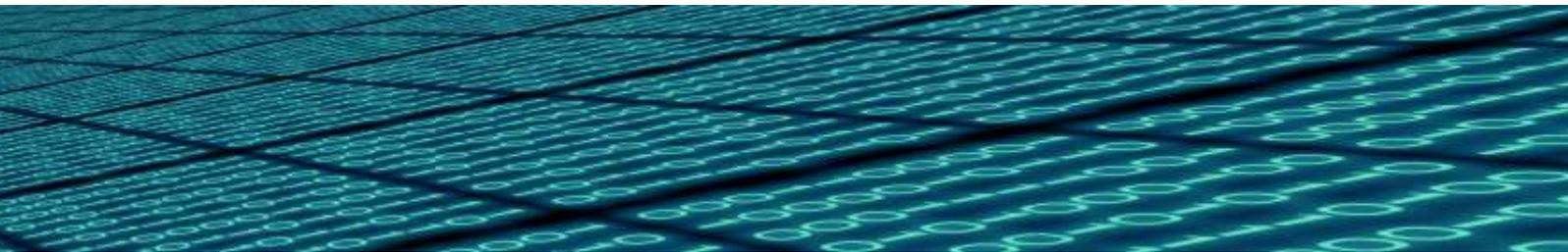
O padrão IS-136 aumenta em três ou seis vezes a capacidade do padrão IS-54, também utilizando a técnica de múltiplo acesso TDMA.

2.4.4 GSM

A falta de uma padronização para um sistema de telefonia móvel no início da década de 90 era um problema mundial. Na tentativa de resolver esse problema, pesquisadores e membros do ETSI (*European Telecommunication Standard Institute*), desenvolveram, baseados no padrão norte americano IS-136 e também utilizando a tecnologia TDMA, a tecnologia que realmente revolucionou o mercado de telecomunicações. Esta tecnologia recebeu o nome de GSM. Com baixo custo de implantação, logo se expandiu por toda Europa e, conseqüentemente, para o resto do mundo.

Takeda (2013) explica que pode-se dividir o evolução do padrão GSM em três fases: GSM fase 1, GSM fase 2 e GSM fase 2+. Estas evoluções e seus respectivos serviços foram sendo desenvolvidos conforme crescia a demanda por novas aplicações. A fase 1 se deu como marco inicial da tecnologia, onde foram criados os serviços básicos usados pelos usuários, como os serviços de emergência, que permitia uma ligação gratuita para a polícia através de redes de operadoras de telefonia diferentes, o SMS e transmissão de dados de 0,3 a 9,6 Kbps.

A fase 2 que ampliou os serviços através dos tele serviços, sistema *half rate*, melhorias no SMS, os serviços de dados, transmissão de *frames* de forma síncrona e dedicada em taxas entre 2,4 e 14,4 Kbps, serviço de identificação de chamadas,

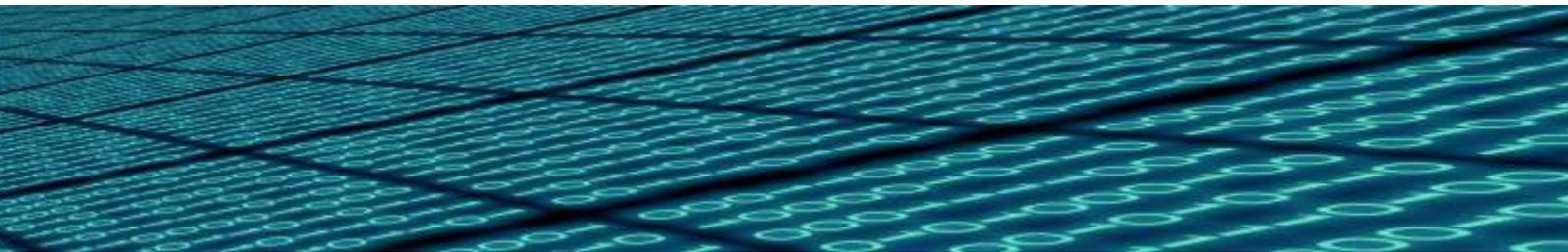


restrição de chamadas por número, chamada em espera, teleconferência e grupo de usuários, entre muitos outros.

E a fase 2+, que introduziu o GPRS (*General Packet Radio Service*), serviço de dados por *frames* em altas taxas de transmissão. O padrão GSM foi o pioneiro ao armazenar informações do usuário, número do telefone, contatos, etc. em *chips* (cartão SIM - *Subscriber Identify Module*) e principalmente criptografar as informações trocadas entre a rede e as EM, utilizando a codificação de identidade temporária do assinante móvel TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*) através de chaves de criptografia CKSN (*Ciphering Key Sequence Number*) que também ficam armazenadas no cartão SIM do sistema móvel.

2.5 Gerações intermediárias – 2,5G

Sverzut (2005) descreve a tecnologia 2,5G como uma geração intermediária entre a 2G e a 3G, que foi concebida de forma prática pelo mercado. Trata-se de tecnologias intermediárias que possibilitaram a evolução das redes e sistemas de 2G para a 3G, algumas inclusive com a operação de serviços de 3G em plataformas e espectro de 2G, indo ao encontro das necessidades do mercado e à demanda dos usuários. De um modo geral, propiciaram uma ponte entre as duas gerações, sendo que a tecnologia adotada como intermediária, fornecerá o indicador tecnológico à 3G.



A seguir são apresentadas, conforme Takeda (2013) e Rappaport (2009), as tecnologias mais importantes do ponto de vista de mercado e volume de usuários.

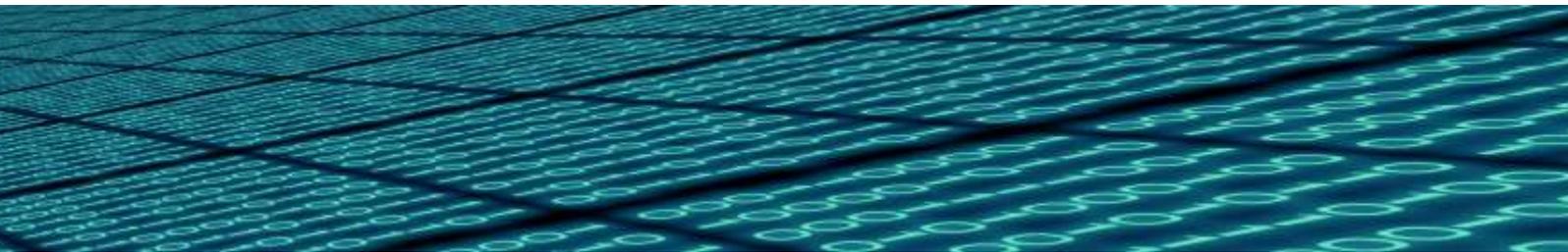
2.5.1 HSCSD

O HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*) é essencialmente uma implementação da transmissão de dados do GSM. Ele é quatro vezes mais rápido que o GSM, com a taxa de transmissão de até 57,6 Kbps, a qual é alcançada através da alocação de oito intervalos de tempo para um único usuário. Esta velocidade de transferências de dados permite que os usuários consigam ter acesso à *internet* ou outros serviços de dados via rede GSM.

Esta tecnologia opera juntamente com a rede GSM, portanto não é necessário *hardware* extra para a operação da comunicação móvel nesse sistema, somente necessita de uma melhoria na rede de *software* e celulares com a tecnologia vigente.

2.5.2 GPRS

Com o grande aumento na popularização de serviços de dados e principalmente na *internet*, na década de 1990, percebeu-se que as redes GSM já não possuíam mais capacidade de suportar a grande demanda de dados nos diferentes estágios do sistema. Para isso, o ETSI, em 1997, publicou o modo de



funcionamento GPRS (*General Packet Radio Services*) na especificação GSM fase 2+.

O GPRS é um serviço de comunicação de dados sem fio baseado em pacotes, projetado para substituir os serviços de comutação de circuitos disponíveis no GSM de segunda geração e IS-136. Redes GSM e IS-136 foram concebidos para comunicação de voz, dividindo a largura de banda disponível em vários canais, cada um dos quais é constantemente atribuído a uma chamada individual.

2.5.3 EDGE

O EDGE (*Enhanced Data for GSM Evolution*) é um padrão de dados móveis de alta velocidade, destinado para os sistemas globais da segunda geração para redes de comunicação móvel GSM e IS-136 para transmitir dados em até 384 Kbps.

O EDGE fornece melhorias na velocidade através da alteração do tipo da modulação usada e faz um melhor uso da portadora, como por exemplo, a portadora de 200 KHz no sistema GSM, e também fornece um caminho evolutivo para os sistemas de terceira geração através da implementação de algumas mudanças.

O EDGE se baseia em melhorias oferecidas pelo GPRS e HSCSD que naquele momento estavam sendo testadas e implantadas. Ele permite uma maior velocidade de transmissão de dados em boas condições, especialmente perto das ERBs.

2.5.4 IS-95B

Rappaport (2009) elucida que ao contrário do que acontece com os padrões IS-136 e GSM, que possuem vários caminhos de evolução para o 3G, o IS-95 e sua tecnologia de acesso CDMA, possuem apenas um caminho, o IS-95B. Esta tecnologia foi implementada em vários lugares do mundo e oferece acesso a dados por comutação por pacotes em alta velocidade em um canal de rádio CDMA comum. Desta forma, dedica múltiplos canais de usuários ortogonais a usuários específicos e para finalidades também específicas. A especificação da taxa de vazão do IS-95 original de 9,6 Kbps foi melhorada para a taxa de 14,4 Kbps.

2.6 Terceira geração da comunicação móvel – 3G

Os sistemas 3G foram desenvolvidos mediante ao acesso a serviços de maneira que nunca tinham sido vistos antes: chamadas ativadas por voz, comunicações usando voz sobre IP (VoIP), acesso à *internet* de alta velocidade, acesso contínuo onipresente, entre outros (RAPPAPORT, 2009). As primeiras gerações de sistemas celulares foram desenvolvidas visando principalmente o tráfego de voz. Tude *et al* (2012) explica, que a exemplo do que ocorreu com a rede fixa, usada cada vez mais para tráfego de dados, na década de 90 surgiram uma série de esforços para ampliar o tráfego de dados nas redes de celulares.

Estes esforços levaram ao projeto IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*) que definiu

os requisitos de um sistema móvel de terceira geração como sendo:

- a) altas taxas de dados: 144 Kbit/s em todos os ambientes e 2 Mbit/s em ambientes indoor e de baixa mobilidade;
- b) serviços baseados em comutação de circuitos e comutação de pacotes;
- c) qualidade de voz comparável à da telefonia fixa;
- d) melhor eficiência espectral;
- e) vários serviços simultâneos para usuários finais, para serviços multimídia;
- f) incorporação suave dos sistemas celulares de segunda geração;
- g) *roaming* global;
- h) arquitetura aberta para a rápida introdução de novos serviços e tecnologias.

A tecnologia 3G teve como base para sua evolução os fundamentos dos padrões IS-136 e IS-95. Os sistemas mais importantes são o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), evoluindo dos padrões GSM, EDGE e GPRS e o CDMA2000, que teve sua evolução baseada nos padrões IS-95 e IS-95B.

2.6.1 UMTS

Mota (2011) define o UMTS como sendo uma tecnologia 3G que tem como intuito oferecer mobilidade ao usuário e ampliar os serviços oferecidos para que além de telefonia o usuário possa ter acesso à *internet* banda larga. Foi padronizado pelo ETSI, mas em 1998 quem assumiu o trabalho de dar continuidade às especificações técnicas foi o 3GPP (*Third*

Generation Partnership Project) em seu projeto chamado *Release 99*.

Segundo Sverzut (2005), o UMTS utiliza como interface de rádio o WCDMA (*Wide Band Code Division Multiple Access*) e suas evoluções. A interface aérea UMTS é chamada UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) e foi especificada pelo 3GPP.

Os principais diferenciais na arquitetura das redes 2G e 3G estão relacionados nas interfaces e protocolos utilizados pela interface aérea (RF). Esta interface aérea UMTS é formada por três camadas de protocolos, sendo eles a camada 1 (física), camada 2 (enlace) e camada 3 (rede). A estrutura dos canais UMTS é formada por três tipos de canal, sendo eles o Canal Lógico, responsável por identificar o tipo de informação que está sendo transportada; o Canal de Transporte, responsável para identificar as características do transporte de dados pela interface aérea; e os Canais Físicos que transportam os canais pela interface aérea (RAMOS,2011).

2.6.2 CDMA2000

O desenvolvimento do CDMA2000 se deu pelo 3GPP 2 (*Third Generation Partnership Project 2*), vindo a ser a primeira tecnologia IMT-2000 implantada no mundo. A principal motivação deste padrão era que as operadoras de redes móveis de comunicação pudessem implementar novas capacidades de acesso à *internet* com altas taxas de dados

gradativamente nos sistemas já existentes, e assim, as operadoras de CDMA puderam introduzir de forma transparente e seletiva, capacidade 3G em cada célula e sem terem que mudar ERBs inteiras ou realocar o espectro (RAPPAPORT, 2009).

Aragão (2013) descreve que mesmo esta interface sendo capaz de suportar altas velocidades de dados, a memória de desenvolvimento está limitada a uma velocidade de pico de 15 Kbps. Sendo assim, mesmo tendo denominação de 3G, é considerado por alguns autores como 2,5G ou 2,75G.

2.7 Gerações intermediárias – 3,5G

2.7.1 HSPA

Com o grande aumento da demanda dos usuário e prestadoras de serviços de comunicações móveis por altas taxas de transferência de dados, a organização 3GPP desenvolveu novas versões para o WCDMA.

Sverzut (2005) explica que a tecnologia HSPA (*High Speed Packet Access*) é uma evolução das redes móveis de terceira geração e é baseada no padrão UMTS (WCDMA), que provê capacidade de transferência de dados com altas taxas de transmissão, tanto no *uplink* quanto no *downlink*.

Basicamente, HSPA é uma tecnologia 3,5G implementada por um conjunto de protocolos que melhora o desempenho das redes de terceira geração UMTS. Existem, conforme Dahlman *et al* (2010) e Mota (2011) duas especificações definidas para a tecnologia HSPA:

a) HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Esta especificação define um protocolo de comunicação padronizado pelo 3GPP em seu projeto chamado *Release 5* e tem como objetivo permitir que as redes UMTS (WCDMA) aumentem a capacidade de transferência de dados por pacote (IP);

b) HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). Esta especificação foi implementada a partir do projeto *Release 6* do 3GPP, com objetivo de melhorar o *uplink*, aumentar a taxa de transmissão de dados e melhorar a capacidade do enlace, servindo assim como complementação para o HSDPA.

2.7.2 HSPA+

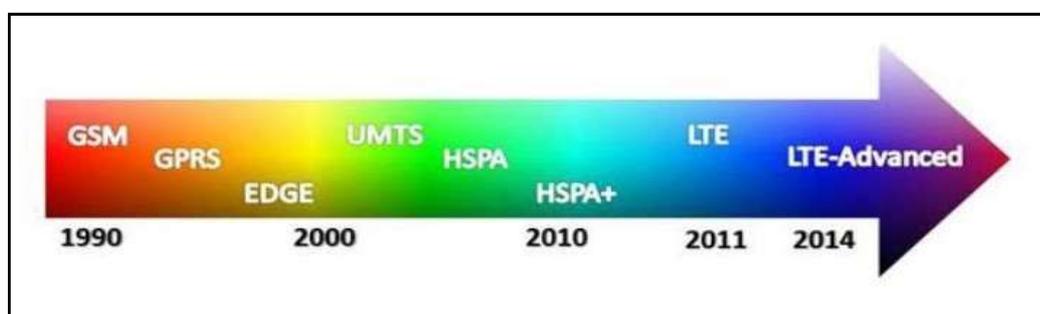
O HSPA desenvolvido, também conhecido como HSPA+, é uma arquitetura de telefonia móvel da terceira geração, definida pelo 3GPP *Release 7*. Introduce o conceito de arquitetura plana para HSPA rádio e aumenta os índices das taxas de transmissão ideais para a transmissão de dados de HSPA.

Além de taxas maiores de transferência de dados, o HSPA+ também oferece outras vantagens, como menor tempo para o estabelecimento de chamadas, capacidade para uso de voz ampliada consideravelmente graças ao uso de VoIP, melhor suporte a aplicações que exigem grandes quantidades de informações e, por se tratar de uma evolução do HSPA, aproveitamento da estrutura de redes deste último tipo.

2.8 Quarta geração da comunicação móvel – 4G

O padrão LTE (*Long Term Evolution*) foi especificado pelo 3GPP em 2004, para melhorar o desempenho das redes UMTS e HSPA, provendo um aumento nas taxas de transferências de dados nos sistemas de telefonia móvel celular de terceira geração. E seu processo evolutivo segue a árvore genealógica do GSM, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Figura demonstrando a evolução da família tecnológica do 3GPP.



Fonte: SVERZUT, 2005.

Esta nova rede teve seu desenvolvimento baseado em uma arquitetura voltada para a comunicação usando somente protocolo IP tanto para dados quanto para voz. Uma nova arquitetura conhecida como SAE (*System Architecture Evolution*) foi necessária devido às características pensadas para o LTE.

As exigências para uma melhor qualidade de serviço foram a motivação para a mudança de padrão, e algumas das motivações para o LTE foram, segundo Rumney *et al* (2013):

- a) Competição entre tecnologias semelhantes;
- b) Redução do custo de transmissão por *bit*;
- c) Maior capacidade de transmissão em redes sem fio;
- d) Melhoria nas redes cabeadas.

Foram necessárias algumas modificações na arquitetura e interface de rede para que esta tecnologia se desenvolvesse e alcançasse os requisitos preestabelecidos. Alguns requisitos foram:

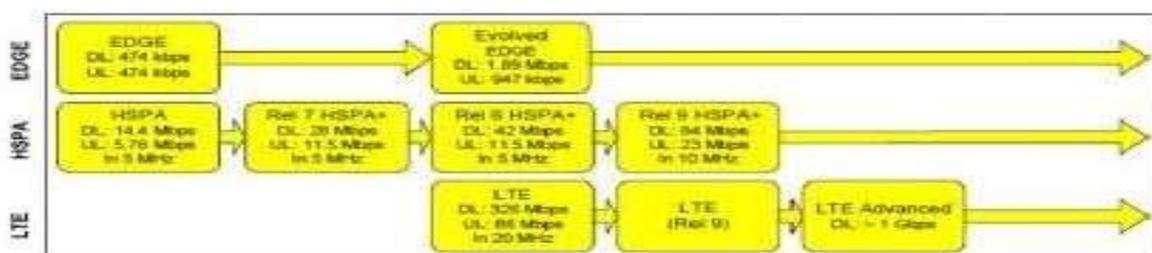
- a) suporte para interoperabilidade entre sistemas 3G do 3GPP e sistemas que não sejam 3GPP;
- b) redução da latência para 10 ms;
- c) largura de banda escalonável nas frequências 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10MHz, 15 MHz e 20 MHz;
- d) melhoria na eficiência espectral com relação à tecnologia precedente;
- e) taxa de vazão de dados de 100 Mbps no enlace direto e 50 Mbps no enlace reverso.

Técnicas que já eram existentes nas redes móveis foram utilizadas pela tecnologia LTE:

- a) OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access);
- b) SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access);
- c) MIMO (Multiple Input Multiple Output).

A Figura 10 a seguir, mostra sucintamente como as redes móveis foram evoluindo até os dias de hoje, antecipando o sucessor para o LTE que ainda se encontra em processo de desenvolvimento.

Figura 10 – Evolução das redes móveis de comunicação



Fonte: ROLIN, 2014.

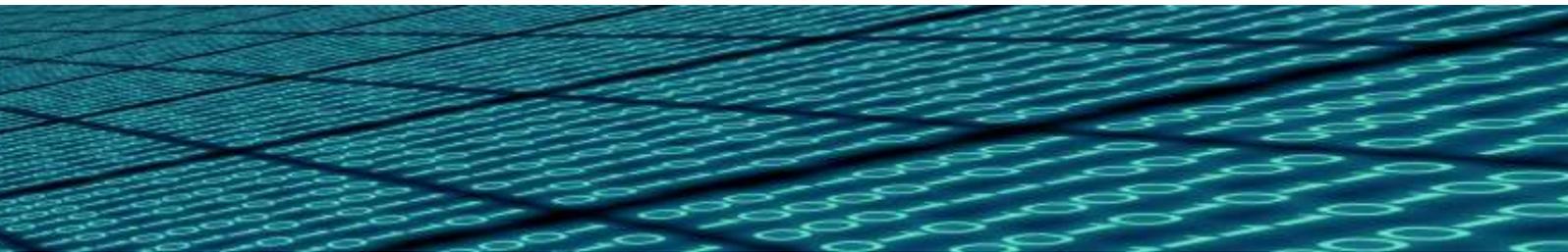
As versões mais atuais do LTE são chamadas de LTE-*Advanced*, mais especificamente o *Release 10*. O LTE-*Advanced* possui aprimoramentos em relação ao LTE, porém é compatível com o mesmo, o que significa que é possível implementar o LTE-*Advanced* em espectros já utilizados pelo LTE. Além disto, para implementação do LTE-*Advanced* são necessárias apenas algumas melhorias nos equipamentos que compõem a rede, o que gera um baixo custo de implementação.

A Tabela 2 ilustra o quanto evoluiu a carga transmitida através do tempo, esses valores eram obtidos teoricamente com as melhores condições de transmissão.

Tabela 2 - Tabela mostrando como as taxas de transferência de dados evoluíram, de acordo com as tecnologias que se sucederam ao longo do tempo.

| Tecnologia | Taxa de pico teórica |
|----------------------|----------------------|
| GSM | 9,6 Kbps |
| IS-95 | 14,4 Kbps |
| GPRS | 171,2 Kbps |
| EDGE | 474 Kbps |
| CDMA-2000 | 307 Kbps |
| UMTS | 1,92 Mbps |
| HSPA | 14,4 Mbps |
| HSPA+ | 84 Mbps |
| LTE | 300 Mbps |
| LTE- <i>Advanced</i> | 1 Gbps |

Fonte: ROLIN, 2014.



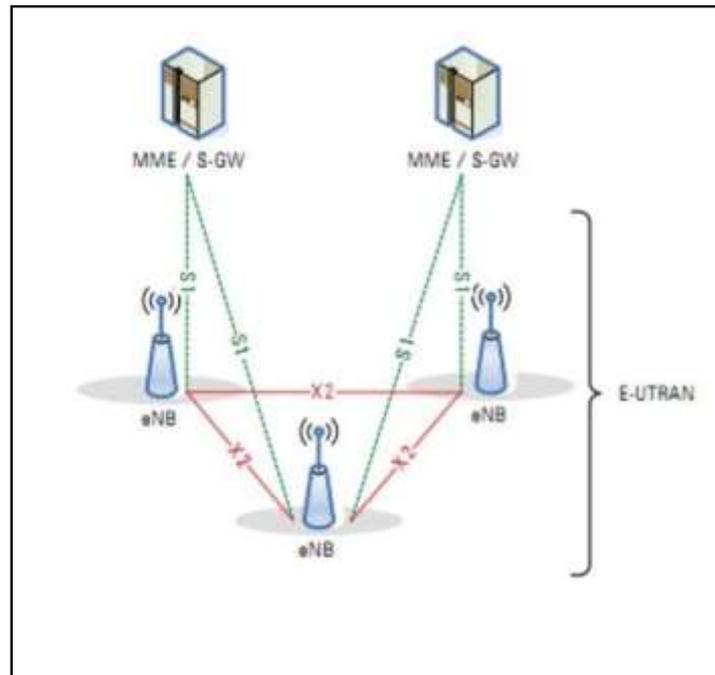
Representado no centro do sistema está o EPC (*Evolved Packet Core*), que serve para fazer a integração de redes que utilizam o protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), tornando-o uma ferramenta essencial para a comunicação entre diferentes tipos de redes, podendo estas serem móveis ou fixas. Com isso, o EPC se torna essencial para que todas as aplicações do LTE sejam atingidas.

Para Pinheiro (2015), na composição do EPC destacam-se alguns elementos:

- a) *Mobility Management Entity* (MME): este elemento é responsável por prover mobilidade ao usuário e pela sinalização, suportar *handover* entre diferentes *eNodeBs* dentro do sistema LTE, assim como, para outras tecnologias, além de estabelecer conexões dos usuários e a autenticação dos mesmos;
- b) *Serving Gateway* (S-GW): O elemento de núcleo de rede S-GW é responsável pelo encaminhamento de pacotes IP entre o equipamento do usuário e a *internet*, atuando como ponto final entre a rede de acesso E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) e o núcleo de rede EPC. O *-serving gateway* atua também disponibilizando mobilidade local dos usuários através de *handovers* entre os *eNodeBs* do sistema LTE e *handovers* com outros sistemas, além de informar à rede o tráfego de dados dos usuários;
- c) *Packet Data Network Gateway* (P-GW): O P-GW é o roteador de borda do sistema LTE com a rede externa. Este elemento é responsável pela interface entre a rede LTE e outras redes de pacotes de dados, como a *Internet*.

A Figura 12 mostra a arquitetura LTE com o E-UTRAN, que contém o elemento de rede chamado *eNodeB*.

Figura 12 – Figura demonstrando a arquitetura LTE com E-UTRAN.

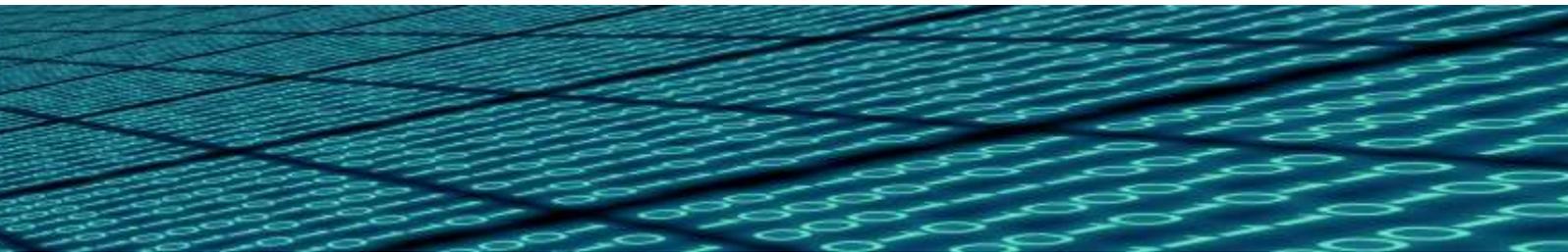


Fonte: KAZAMATSUJIGUSHI *et al*, 2013.

Na Figura 12 percebe-se que os *eNodeBs* estão conectados através das interfaces X2, já o E-UTRAN é conectado ao EPC pelas interfaces S1, sendo estas também responsáveis pela conexão dos *eNodeBs* com o MME/S-GW.

As principais funcionalidades do *eNodeB*, segundo Rolin (2014), são:

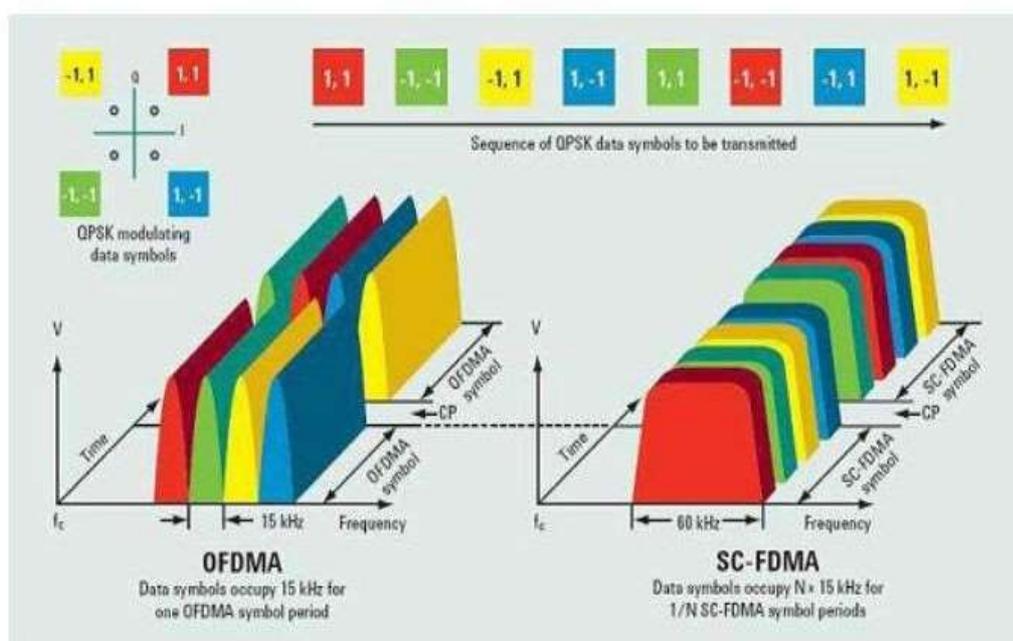
- a) Transmissão dos dados – A transmissão e a recepção de dados é feita através da interface rádio. Os usuários por meio da interface rádio, se conectam à rede EPC, garantindo assim, o acesso aos seus serviços em qualquer lugar. O *eNodeB* é responsável pela modulação/demodulação dos sinais, bem como pela codificação/decodificação do canal rádio;

- 
- b) Coordenação da interferência *inter-cell* – Esta funcionalidade tem o objetivo de realizar a gestão dos recursos de rádio, de forma a controlar a interferência entre diferentes células. Para isto, é necessária a troca de informações entre os diferentes canais de rádio, associadas às diferentes células;
 - c) Balanceamento da carga – Esta função tem o objetivo de fazer a gestão de tráfego garantindo o balanceamento de carga entre as diferentes células. Desta forma, podem ser tomadas decisões que levam à decisão de *handover* de forma a redistribuir o tráfego, garantindo uma maior qualidade aos usuários, assegurando a diminuição da probabilidade de queda de chamadas;
 - d) Sincronização - Para garantir a sincronização da rede EPC, cada *eNodeB* possui um circuito lógico para possibilitar a recepção de sinais de forma independente ao método de sincronismo escolhido;
 - e) Mobilidade – Esta função gera a mobilidade do terminal enquanto o mesmo permanece no estado ativo. Caso o terminal esteja no modo ocioso, a gestão é efetuada pela rede core. É necessária a existência de medidas da qualidade do sinal de rádio, para a correta execução desta funcionalidade, assim como, a existência de algoritmos de *handover* que determinem o momento em que deva ser executado, definindo desta forma, a célula alvo.

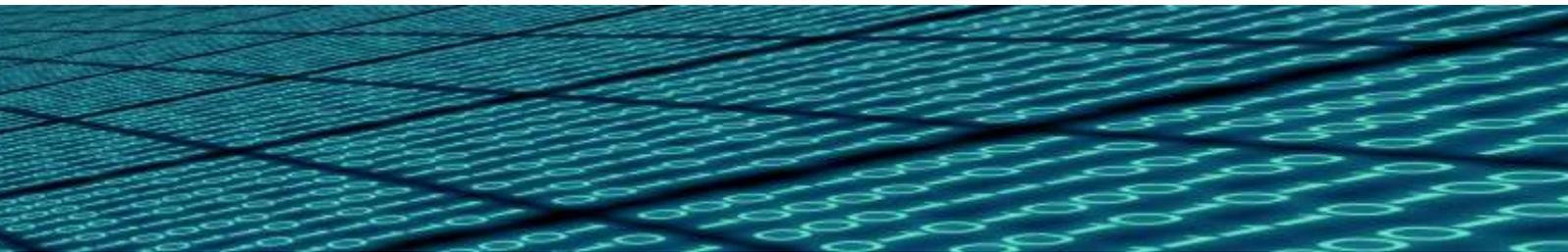
3.2 Interface aérea

A adoção de uma nova interface sem fio baseada na tecnologia OFDM possibilita alcançar alta velocidade na transmissão de dados, com uma implementação de baixo custo e eficiência 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*. 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 13 ilustra um comparativo entre as transmissões em OFDMA e SC-FDMA.

Figura 13 – Gráfico da transmissão utilizando OFDMA comparado com SC-FDMA.



Fonte: ROLIN, 2013.



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 isto, 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.

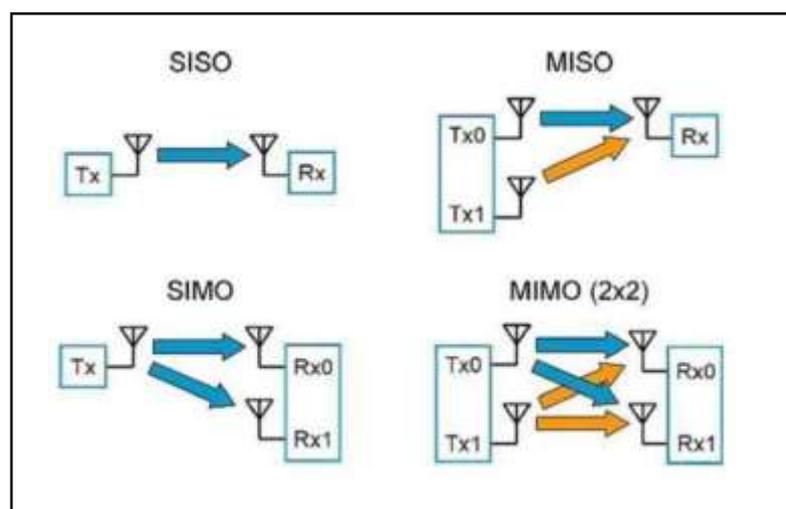
3.3 Técnicas de múltiplas antenas

Para que seja possível o aumento da cobertura e da capacidade da camada física, são utilizadas técnicas de múltiplas antenas. Com a inclusão de mais antenas, é possível que o desempenho da rede seja melhorado, pois os sinais irradiados terão diferentes caminhos físicos (ROLIN, 2014).

Os rótulos utilizados para nomear os modos de acesso do canal de rádio propagação, dizem respeito às entradas e saídas do canal de rádio, ao invés dos transmissores e receptores dos dispositivos.

Pode ser observado na Figura 14 a representação das principais técnicas de acesso de múltiplas antenas que podem ser utilizadas no LTE.

Figura 14 – Figura demonstrando os sistemas de acesso de múltiplas antenas



Fonte: ROLIN, 2013

Pode ser notado que podem ocorrer variações para utilização de múltiplas antenas, onde a sigla SI significa uma única entrada, SO significa uma única saída, MI significa entradas múltiplas e MO significa múltiplas saídas.

A seguir serão especificadas, conforme Rolin (2014), as principais técnicas de acesso de múltiplas antenas.

3.3.1 *Single Input Single Output (SISO)*

O modo de acesso ao canal de rádio mais básico possui uma única saída e uma única entrada (SISO), em que apenas uma antena transmissora e uma antena receptora são usadas. Tem sido a forma de comunicação padrão, desde o surgimento do rádio, sendo comparada com todas as demais técnicas de antena.

3.3.2 *Single Input Multiple Output (SIMO)*

Este modo de acesso ao canal de rádio possui uma única entrada e múltiplas saídas, tendo boa adaptação às condições de baixa relação sinal/ruído, a partir do qual o ganho teórico de 3 dB é possível, quando dois receptores são usados. Não há mudança na taxa de dados, desde que apenas um fluxo de dados seja transmitido, mas a cobertura da célula é melhorada, em função da redução da SNR (*Signal Noise Ratio*).

3.3.3 *Multiple Input Single Output (MISO)*

A técnica com múltiplas entradas e única saída (MISO) utiliza dois ou mais transmissores e um receptor. É mais comumente referido como diversidade de transmissão. Dessa forma, os dados são enviados codificados em ambas as antenas de transmissão, de tal modo que o receptor pode identificá-los. Diversidade nas transmissões aumenta a robustez do sinal contra desvanecimento, podendo aumentar o desempenho em condições de baixa SNR. A técnica MISO não aumenta as taxas de dados, mas ela suporta as mesmas taxas de dados utilizando menos potência.

3.3.4 *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*

O LTE foi projetado de forma que seu sistema fornecesse altas taxas de transmissão. Porém as redes móveis estão sujeitas a interferências, o que limita as taxas de transmissão de dados.

O aumento das taxas de transmissão é possibilitado através das técnicas *Multiple Input Multiple Output* (MIMO),

onde este aumento é conseguido através da utilização de várias antenas para transmissão e recepção dos sinais, o que melhora a dimensão espacial resultante da utilização de múltiplas antenas distribuídas espacialmente.

Para o modo de transmissão, este sistema suporta sete modos, que são utilizados de forma a obter o melhor desempenho em relação aos canais, SNR e condições de mobilidade do usuário. Estes modos de transmissão utilizados em múltiplas antenas estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Modos de transmissão em *downlink* no LTE.

| Índice | Modo de transmissão | Descrição |
|--------|---------------------------------------|---|
| 1 | <i>Single-antenna port; port 0</i> | A transmissão é feita por uma antena e a recepção por uma (SISO) ou mais antenas (SIMO). |
| 2 | <i>Transmit Diversity</i> | A mesma informação é transmitida por múltiplas antenas e combinada na recepção, melhora a qualidade de ligação, mas não aumenta a capacidade. |
| 3 | <i>Open loop spatial multiplexing</i> | Informação distinta é enviada por duas ou mais antenas sem informação explícita das condições do canal, permite aumentar a capacidade. |

| | | |
|---|--|---|
| 4 | <i>Closed loop spatial multiplexing</i> | Semelhante ao anterior, com a distinção do uso de uma matriz de pré-codificação sinalizada pelo UE (<i>User Equipment</i>), permitindo otimizar a transmissão e facilitando a decodificação dos fluxos de informação. |
| 5 | <i>Multi-user MIMO</i> | Semelhante ao modo anterior, nos quais os fluxos de informação são orientados para <i>UEs</i> distintos, existindo uma partilha de recursos em que todos têm a mesma taxa de transmissão, mas a capacidade da célula aumenta. |
| 6 | <i>Closed loop Rank 1 with precoding</i> | A mesma informação é transmitida em uma única camada espacial. Controla as relações de fase dos sinais elétricos irradiados para as antenas, para, assim, orientar fisicamente a energia transmitida. |
| 7 | <i>Single-antenna port; port 5</i> | A mesma informação é enviada em uma única camada espacial, um sinal de referência forma um ponto de antena adicional permitindo que a transmissão seja feita em mais de quatro antenas. |

4 INDICADORES DE QUALIDADE

4.1 Qualidade de serviço (QoS)

Os requisitos de QoS são definidos como um conjunto de requisitos que definem níveis que são aceitáveis dentro de uma operação para fornecimento de serviço. Para que a qualidade de serviço seja avaliada na rede LTE são utilizados alguns critérios:

- a) débito: define a quantidade de *bits* transmitidos por unidade de tempo;
- b) latência: atraso em relação à entrega de pacotes;
- c) perda de pacotes: representa a quantidade de pacotes que não foram recebidos dentre os pacotes enviados.

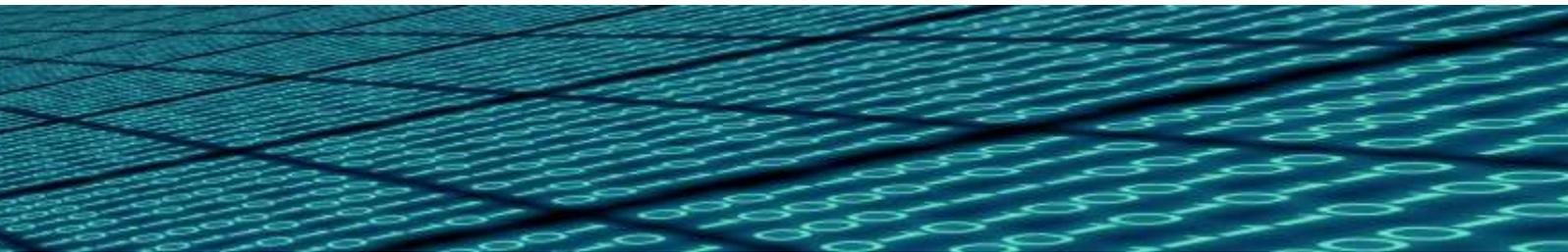
Para Nascimento (2012), existem cinco parâmetros de qualidade definidos nas especificações do 3GPP, em 2010 e mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de qualidade nas redes LTE.

| CQI | Tipo de recurso | Prioridade | L2 Delay Budget | L2 Packet Loss Rate | Exemplo de Aplicações |
|-----|-----------------|------------|-----------------|---------------------|--|
| 1 | GBR | 2 | 100 ms | 10 ⁻² | VoIP |
| 2 | GBR | 4 | 150 ms | 10 ⁻³ | Chamadas de Vídeo |
| 3 | GBR | 5 | 300 ms | 10 ⁻⁶ | <i>Streaming</i> |
| 4 | GBR | 3 | 50 ms | 10 ⁻³ | Jogos em tempo real |
| 5 | Non-GBR | 1 | 100 ms | 10 ⁻⁶ | Sinalização IMS |
| 6 | Non-GBR | 7 | 100 ms | 10 ⁻³ | Jogos interativos |
| 7 | Non-GBR | 6 | 300 ms | 10 ⁻⁶ | <i>Browsing</i> , correio eletrônico, <i>download</i> de ficheiros, etc. |
| 8 | Non-GBR | 8 | 300 ms | 10 ⁻⁶ | |
| 9 | Non-GBR | 9 | 300 ms | 10 ⁻⁶ | |

Fonte: NASCIMENTO, 2012.

O primeiro parâmetro é o QoS *Class Identifier* (QCI), este é um índice transmitido que identifica um conjunto de valores



definidos para os atributos QoS. As classes estão especificadas segundo duas categorias de portadoras, *Guaranteed Bit Rate* (GBR) e *Non-Guaranteed Bit Rate* (Non-GBR), sendo o débito binário garantido ou não. A Prioridade define a ordenação dos pacotes na interface rádio, o *Delay Budget* é usado para manter um escalonamento de pacotes de acordo com o serviço requisitado e o *Packet Loss Rate* é usado para configurar o número de retransmissões (NASCIMENTO, 2012).

As operadoras estão livres para criar suas próprias classes, com combinações diferentes destes atributos.

4.2 Key Performance Indicators (KPI's)

Em uma rede móvel é necessário definir indicadores e metas para que seja possível caracterizar o estado da rede e para identificar possíveis problemas, sendo que estes podem já ter sido utilizados em redes anteriores ou próprios para o LTE.

Segundo o 3GPP, existem cinco categorias distintas para classificar os KPI's: acessibilidade (*accessibility*); retenção (*retainability*); integridade (*integrity*); disponibilidade (*availability*) e mobilidade (*mobility*).

Será feita uma breve descrição, de acordo com Nascimento (2012), de cada *KPI* e serão descritos os problemas típicos que possam surgir devido à falha ou não utilização destes indicadores. Também serão descritos os possíveis efeitos dos problemas retratados e a melhor forma de obter estes indicadores.

4.2.1 Acessibilidade

De modo a oferecer serviços para os usuários, em primeiro lugar deve-se estabelecer uma conexão à rede. Caso o serviço não consiga ser oferecido ao usuário isto pode refletir em uma perda no faturamento para as operadoras, o que pode acarretar uma insatisfação cada vez maior por parte do usuário e em último caso a perda do cliente.

Por isto a importância da existência de indicadores que permitam avaliar o acesso à rede e aos serviços. Por este motivo são definidos *KPI's* de acessibilidade, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - *KPI's* da categoria acessibilidade.

| <i>Key Performance Indicators</i> | Descrição | Problemas típicos | Efeitos dos problemas | Medição |
|---|--|--|---|---------|
| Attach Success Ratio | Razão entre <i>attach's</i> bem-sucedidos e todas as tentativas efetuadas. | Rejeição: a subscrição do utilizador não permite o acesso. Falha: problemas nos processos de acesso aleatório ou no estabelecimento de uma conexão RRC. | O <i>UE</i> não se consegue registrar na rede e não pode utilizar quaisquer serviços. | |
| RRC Connection Establishment Success Ratio | Razão entre conexões RRC bem-sucedidas e todas as tentativas efetuadas. | Rejeição: Caso a QoS das Conexões anteriores não seja cumprida com o estabelecimento de novas. Falha: potência de sinal baixa; Alta interferência; problemas no acesso aleatório. | O <i>UE</i> mantém-se no estado <i>Idle</i> sem acesso ao serviço pretendido. | |

| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| Random Access Process Success Ratio | Razão entre acessos aleatórios bem-sucedidos e todos os acessos aleatórios. | Falha: Cobertura insuficiente;nível de interferência elevado; problemas de mobilidade; alocação de recursos inadequada; parâmetros dos acessos aleatórios inadequados. | Pode levar a falhas no restabelecimento de conexões RRC; falhas de <i>handover</i> . | É preferível o uso de <i>drive-tests</i> , pois do lado da rede podem não ser |
| Default EPS Bearer Establishment Success Ratio | Razão entre a atribuição bem-sucedida da portadora EPS por defeito e do número total de atribuições da mesma portadora. | Rejeição: recursos insuficientes. Falha: problemas no acesso aleatório; cobertura deficiente; interferência elevada. | Como a portadora EPS não é atribuída o utilizador não tem endereço IP nem conexão com o P-GW. | |
| Dedicated EPS Bearer Establishment Success Ratio | Razão entre a atribuição bem-sucedida de portadoras EPS dedicadas e do número total dessas portadoras. | Rejeição: recursos insuficientes; erros nos identificadores; serviços não suportados. Falha: problemas nas camadas inferiores. | O serviço correspondente à portadora dedicada não é atribuído ao UE, deixando de existir garantias de QoS na transferência. | |

Fonte: NASCIMENTO, 2012.

4.2.2 Integridade

Esta categoria permite que a operadora avalie a qualidade das ligações oferecidas, além de analisar o serviço de transferência de pacotes IP. Na Tabela 6 são definidos os

indicadores mais importantes para avaliar a integridade das conexões.

Tabela 6 - KPI's da categoria integridade.

| <i>Key Performance Indicators</i> | Descrição | Problemas típicos | Efeitos dos problemas | Medição |
|---|---|---|---|---|
| <i>RSRP Level of the Best Available Cell</i> | Nível do sinal RSRP da célula com o valor mais elevado. | Baixo nível de sinal RSRP: número de células na rede insuficiente ; posição das antenas; ambiente de propagação . | Falhas nas ligações rádio; problemas de handovers; <i>throughputs</i> baixos e inexistência de serviço. | Através de <i>drive-tests</i> com scanner ou com UE. É possível à rede pedir as medidas feitas no UE mas localização das mesmas é bastante imprecisa. |
| <i>RSRQ Level of the Best Available Cell</i> | Nível do sinal RSRQ da célula com o valor mais elevado. | Baixo nível de sinal RSRQ: nível de sinal RSRP baixo; interferência elevada. | Um nível baixo do sinal RSRQ cria problemas semelhantes a um baixo nível de sinal RSRP. | Feito da mesma forma que o sinal RSRP. |
| <i>SINR Level of the Serving Cell</i> | Relação sinal/ruído mais interferência obtida por TTI ou média. | SINR baixa: má cobertura e/ou interferência elevada. | Uma SINR baixa reflete-se diretamente no débito binário oferecido podendo levar a problemas na ligação. | Através de <i>drive-tests</i> para o <i>downlink</i> e das estatísticas de rede em <i>uplink</i> . |

| | | | | |
|---|--|--|--|---|
| <p><i>BLER Level of the Serving Cell</i></p> | <p>Relação entre o número de blocos errados eo número total de pacotes transmitidos.</p> | <p>BLER elevada: baixa qualidade de sinal; problemas nos equipamentos.</p> | <p>Taxa de erros elevada: aumento das retransmissões; latência elevada; débitos binários baixos.</p> | <p>Através de <i>drive-tests</i> parao <i>downlink</i> e das estatísticas de rede em <i>uplink</i>.</p> |
| <p><i>CQI Index of the Serving Cell</i></p> | <p>Indicador da qualidade do canal reportado pelo UE.</p> | <p>Apresenta um comportamento semelhante ao da SINR. Podendo ser usado para despiste de problemas.</p> | <p>Valores de CQI baixos: também débitos baixos.</p> | <p>Através de <i>drive-tests</i> ou das estatísticas de rede.</p> |
| <p><i>RI of the Serving Cell</i></p> | <p>Indicador com o número de camadas espaciais suportadas na transmissão.</p> | <p>Se RI se mantiver durante demasiado tempo a 1: pode indicar desperdício de capacidade pois apenas se utiliza um domínio espacial.</p> | | |

| | | | | |
|---|--|---|--|--|
| Number of RRC Connections and Active RRC | Contabiliza as mudanças de estado de <i>idle</i> para <i>connected</i> e as conexões | Utilizadores que realizam tráfego constantemente e sempre conectados: | Um número elevado de novas conexões pode causar atraso/falha nos | |
|---|--|---|--|--|

| | | | | |
|---------------------------|---|--|--|--|
| Connections | ativas. | número elevado de conexões ativas e baixo de novas conexões. Utilizadores esporádicos : número elevado de conexões ativas e baixo de tentativas. | acessos aleatórios ou falhas no estabelecimento de conexões RRC. Caso as conexões ativas excedam limite do eNodeB o QoS degrada-se para alguns utilizadores. | |
| Cell-Specific Load | Definida como a razão entre o número de recursos alocados e o número total. | Carga da célula elevada: grande número de utilizadores ; tipos de serviço exigentes; más condições rádio por utilizador. | Controle de admissão rejeita novas ligações, diminui a qualidade das existentes ou pode cancelar alguma das ligações ativas. | A carga da célula é obtida pelas estatísticas da rede. |

| | | | | |
|-------------------------------------|---|--|---|--|
| Throughput | Débito binário por utilizador, de uma célula em particular ou de toda a rede. | Débito binário baixo pode dever-se a: Má qualidade de sinal, carga elevada na rede, características do terminal, restrições impostas, problemas de mobilidade, <i>backbone</i> da rede com baixa capacidade ou apenas por pouca utilização dos recursos. | Um débito binário mais baixo que o pretendido é imediatamente perceptível pelo utilizador refletindo-se no QoS. O débito binário da rede é uma importante métrica para avaliação do desempenho geral. | O débito binário do utilizador pode ser obtido através de <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede. O tráfego das células apenas pode ser obtido pelas estatísticas. |
| Modulation and Coding Scheme | As modulações e codificações (MCS) utilizadas. | MCS de baixa ordem: baixo SINR no receptor; problemas de mobilidade podem afetar negativamente o SNR. | A MCS usada tem um impacto direto no <i>throughput</i> . Modulações de baixa ordem não oferecem débitos binários elevados. | Podem ser obtidas por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas de rede. |
| User Plane Latency | A latência no plano do utilizador é definida usualmente como o RTT. | Latência elevada pode ter origem em seis pontos: <ul style="list-style-type: none"> - Processamento (UE e eNB); - Transmissão (downlink | A latência elevada afeta particularmente os serviços de tempo real com condições exigentes, afetando a | O RTT pode ser medido através de <i>drive-tests</i> . |

| | | | | |
|--|--|---|-----------------------|--|
| | | e uplink); - Escalonamento (pedido e admissão); - Retransmissão; - Core da rede; - Localização do P-GW. | qualidade de serviço. | |
|--|--|---|-----------------------|--|

Fonte: NASCIMENTO, 2012.

Tendo em vista que a qualidade da ligação tem influência direta na satisfação do cliente, ou seja, baixos débitos binários ou latências muito altas não são desejáveis.

Logo, são necessários *KPI's* que permitam avaliar a qualidade das ligações efetuadas. Caso estes apresentem problemas cabe à operadora apresentar soluções para melhoria do serviço.

4.2.3 Mobilidade

Considerando que o LTE é uma rede móvel, é necessário que existam medições referentes ao desempenho de um *UE* (*User Equipment*) em movimento. Ligado à mobilidade do *UE* está o processo de *handover*, imprescindível em sistemas de comunicações móveis. Nesta categoria são efetuadas medições com o objetivo de verificar a porcentagem de tentativas de *handover* que obtiveram êxito dentre todas as solicitações. Um *handover* não completado ocasiona interrupção de serviço, seja este uma chamada ou transferência de dados.

É válido explicar que no sistema de telecomunicações existem dois tipos de *handover*, o primeiro tipo é chamado *soft handover*, quando o *UE* faz a solicitação da troca de estação, o *eNodeB* de origem mantém-se conectado ao *UE* mesmo depois de realizada a troca para *eNodeB* alvo, preservando sua conexão para o caso de surgir algum problema e o *UE* ter que voltar para o *eNodeB* de origem. Já o segundo tipo é o chamado *hard handover*, onde assim que a estação alvo aloca os recursos para o *UE*, o *eNodeB* de origem encerra a conexão e disponibiliza seus recursos para outro usuário.

Estão definidos na Tabela 7 indicadores da categoria mobilidade, considerando distintas origens da interrupção do serviço.

Tabela 7 - KPI's da categoria mobilidade.

| Key Performance Indicators | Descrição | Problemas típicos | Efeitos dos problemas | Medição |
|----------------------------|--|--|---|---------|
| Number of Handovers | Contabiliza o número de intrae de <i>inter handovers</i> . | A quantidade de <i>handovers</i> depende de: Área das células, nível de sinal, mobilidade, parâmetros de <i>handover</i> . | Como no LTE apenas existem <i>hard handovers</i> , chegada dos pacotes ao novo destino pode provocar atrasos afetando o QoS dos serviços. Além do mais, os <i>handovers</i> consomem recursos de sinalização. | |

| | | | | |
|--|---|--|--|--|
| <p>Ping-Pong Handover Ratio</p> | <p>A razão entre <i>handovers</i> “ping-pong” de células adjacentes e o número total de <i>handovers</i>.</p> | <p>O número elevado deve-se usualmente a um processo de <i>Handover</i> demasiado rápido, falta de uma célula dominante e listas de vizinhanças ineficazes.</p> | <p>Deve-se evitar pois não traz nenhuma vantagem e consomem recursos de sinalização.</p> | <p>Pode ser medido por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede.</p> |
| <p>Time In the Best Cell</p> | <p>Definido como a percentagem de tempo que o UE se encontra na célula com melhor RSRP.</p> | <p>Se o processo de <i>handover</i> for moroso ou a mobilidade for elevada este valor torna-se baixo.</p> | <p>Tempos baixos identificam utilizadores que estão ligados mais tempo a <i>eNodeB's</i> com um <i>path-loss</i> maior, levando ao aumento da interferência na rede.</p> | |
| <p>Intra-LTE Handover Success Ratio</p> | <p>Razão entre o número de <i>intra-handovers</i> e o número de <i>handovers</i> total.</p> | <p>Percentagem baixa: rejeição pelo controle de admissão e congestão devido a uma carga elevada; medidas e comandos para <i>handover</i> podem falhar devido a uma baixa qualidade de sinal; timer de <i>handover</i> chega ao fim antes de existir conexão.</p> | <p>Falha nos <i>handovers</i> pode levar a um decréscimo da qualidade de sinal e à queda de ligação se o nível de sinal continuar a piorar.</p> | |

| | | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|--|
| Handover Delay (Detach Delay) | Contabiliza o tempo que o UE não está conectado à rede durante o processo de <i>handover</i> . | O atraso depende tipicamente de problemas de acesso aleatório. | Quanto maior a interrupção da ligação maior a degradação do QoS. | |
|--------------------------------------|--|--|--|--|

Fonte: NASCIMENTO, 2012.

4.2.4 Retenção

Quando um usuário acessa um serviço espera que este se mantenha ativo durante todo o tempo de utilização, no entanto é possível que ocorram interrupções. Para que seja possível avaliar o impacto destas interrupções e o desempenho da rede é necessário definir *KPI's* que avaliem a retenção dos serviços. Na Tabela 8 são definidos indicadores do quesito retenção.

Tabela 8 - *KPI's* da categoria retenção.

| <i>Key Performance Indicators</i> | Descrição | Problemas típicos | Efeitos dos problemas | Medição |
|-----------------------------------|--|-------------------------------|---|---------|
| | | Baixo nível de | | |
| | Contabiliza o número de | sinal RSRQ: nível de sinal | | |
| Number of Radio Link | vezes que existe uma falha na ligação rádio dependendo | RSRP baixo; interferência | O estado do UE passa para <i>idle</i> eo fluxo de dados é interrompido. | |

| | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| Failures | dos | elevada; problemas no | | |
| | parâmetros | acesso aleatório; | | |
| | especificados. | inexistência de | | Através de |
| | | vizinhas. | | <i>drive-tests</i> ou |
| | | | | pelas estatísticas |
| | Razão entre o número de | | Quando a portadora dedicada é desativada o UE deixa de ter acesso ao serviço. | de rede. |
| | portadoras EPS | Desativação: | | |
| EPS Bearer Cut-Off Ratio | desativadas sem pedido explícito | reativação da portadora; erros | | |
| | e a totalidade de | na rede. | | |
| | portadoras EPS | | | |
| | atribuídas. | | | |
| | | | | |

Fonte: NASCIMENTO, 2012.

4.2.5 Disponibilidade

Os indicadores de disponibilidade refletem a porcentagem de tempo que as células se encontram ativas. Caso o acesso à rede não estiver ativo a operadora não pode cobrar pelos seus serviços, tendo em vista que a falta de serviços acarreta em grande insatisfação por parte dos usuários. Os *KPI's* da categoria disponibilidade estão definidos na Tabela 9.

Tabela 9 - KPI's da categoria disponibilidade.

| <i>Key Performance Indicators</i> | Descrição | Problemas típicos | Efeitos dos problemas | Medição |
|------------------------------------|--|---|--|---|
| <i>Cell Availability</i> | Percentagem de tempo que uma célula permite acesso rádio mínimo pelo tempo de medição definido. | Falhas de energia, problemas nos equipamentos . | Impossibilidade e de oferecer serviço: quebras na faturação e na satisfação geral. | Pode ser medido por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede. |
| <i>Network Availability</i> | Percentagem de tempo que um agregado de células permite acesso rádio pelo tempo de medição definido. | Falhas de energia, problemas nos equipamentos . | Impossibilidade e de oferecer serviço: quebras na faturação e na satisfação geral. | Pode ser medido por <i>drive-tests</i> |

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Introdução ao simulador

Para realizar simulações da tecnologia LTE, foi utilizado o *Link Level Simulator*, um simulador desenvolvido pela Universidade de Vienna e escrito em Matlab. Este simulador contém diversos *scripts* que reproduzem algumas funcionalidades do LTE.

Ao longo das simulações espera-se obter gráficos onde seja possível fazer comparações entre o comportamento da rede através de alguns parâmetros que iremos definir. Iglesias (2014) e Carrasco (2011) explicam que alguns parâmetros que podem ser definidos são:

- a) quantidade de *eNodeBs*;
- b) posicionamento dos *eNodeBs*;
- c) número de usuários por célula;
- d) quantidade de antenas de transmissão e recepção;
- e) tipos de antenas e configuração (3 setores, 6 setores, 3 setores com femtocélulas, etc.);
- f) frequência de operação na rede;
- g) potência do sinal emitido.

Estes são alguns parâmetros que podem ser definidos no modo de simulação, existem ainda outros que serão definidos para que se possa atingir o objetivo deste trabalho, que é chegar o mais próximo de uma área de 4km² urbana e densa, onde haja sobrecarregamento de rede, no centro da cidade de Pelotas. O processo de simulação foi dividido em duas partes, nas quais

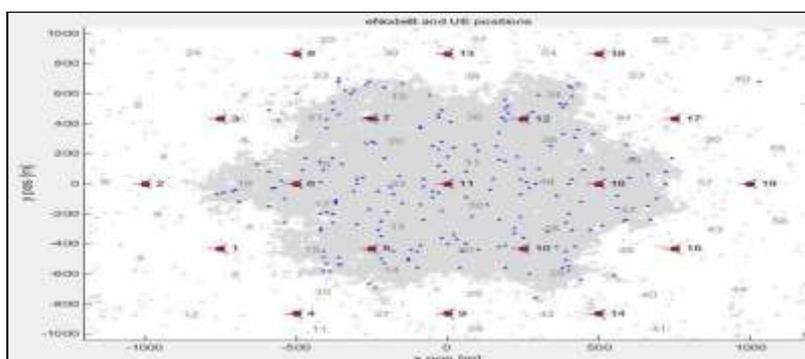
foram realizadas simulações muito parecidas, sendo alterados alguns parâmetros com a finalidade de melhorar a capacidade da rede. Após as simulações os dados foram comparados e extraídas informações para a melhoria do desempenho da rede.

Para melhor entendimento do simulador, realizou-se simulações com as configurações padrões para que fosse possível avaliar quais de suas funcionalidades seriam úteis no trabalho e quais dados gerados poderiam ser aproveitados. As configurações que já estavam definidas foram:

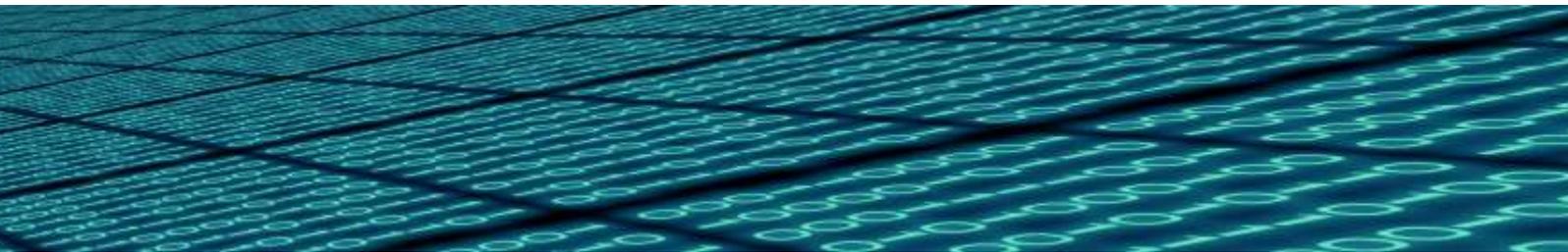
- a) quantidade de usuários por célula;
- b) número de antenas de transmissão e recepção;
- c) escolha do número de setores por antena (*tri sector, six sector, tri sector plus femtocells, etc.*);
- d) frequência de trabalho da rede.

A Figura 15 demonstra o mapa gerado pelo simulador, cuja versão utilizada disponibiliza um mapa com dimensões máximas de 2 Km x 2 Km. A configuração padrão do simulador gera os *eNodeBs* de forma linear, produzindo células hexagonais, já os usuários são alocados de forma randômica, conforme quantidade pré-estabelecida.

Figura 15 – Mapa com distribuição dos *eNodeBs* e usuários.



Fonte: Autor.



Para esta simulação foram adotados 10 usuários por célula, e a configuração das antenas foi determinada como sendo três setores espaçados de 120 graus cada um, na faixa de frequência de 2500 MHz e com largura de banda de 20 MHz. No simulador podem ser demarcadas as áreas que se deseja avaliar. No caso desta simulação, a área avaliada está marcada em cinza, e as estatísticas foram:

- a) número de usuários na área demarcada = 210;
- b) taxa de transferência média por unidade móvel = 5,66 Mb/s;
- c) eficiência espectral média por usuário = 3,71 bit/cu;
- d) quantidade de blocos de recurso por intervalo de tempo de transmissão por unidade móvel RBs/TTI/UE = 9,90 RBs.

O simulador gera alguns resultados agregados, que se baseiam nas mesmas configurações anteriores e levam em conta as mesma células selecionadas. Os resultados foram:

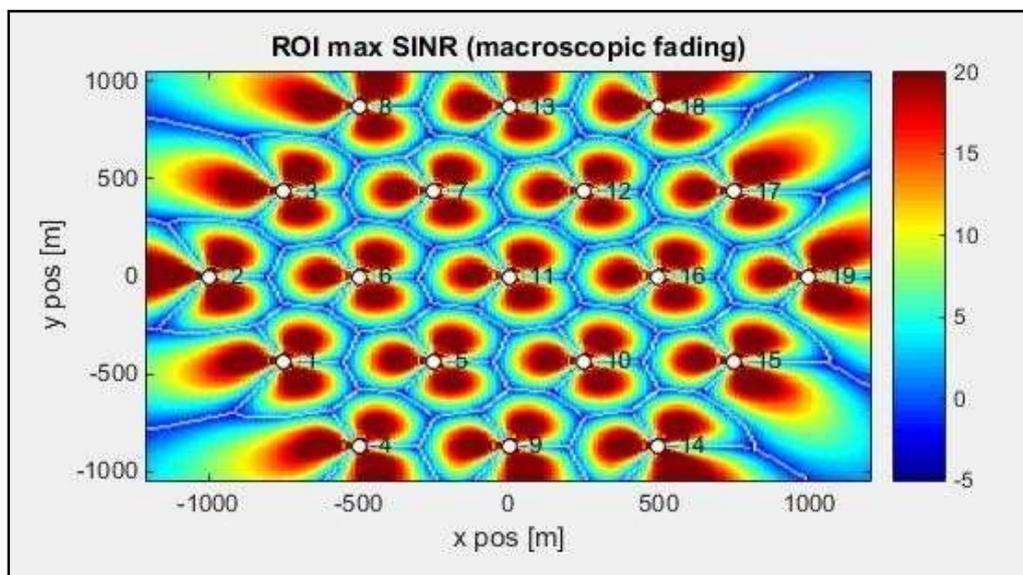
- a) pico de taxa de transferência = 19,68 Mb/s;
- b) taxa de transferência média por usuário = 5,66 Mb/s;
- c) taxa de transferência média por célula = 35,46 Mb/s;
- d) porcentagem de ocupação dos blocos de recurso = 93,43%.

Com base nas simulações, como mostrado na Figuras 16 e 17, pode-se verificar o comportamento da propagação do sinal.

A Figura 16, abaixo, mostra como a qualidade de sinal varia, principalmente ao longo da distância até o *eNodeB*. Desta forma pode-se dizer que temos um efeito atenuante de certo modo homogêneo. Na Figura 17, percebe-se uma maior distorção gerada pelos obstáculos encontrados durante o

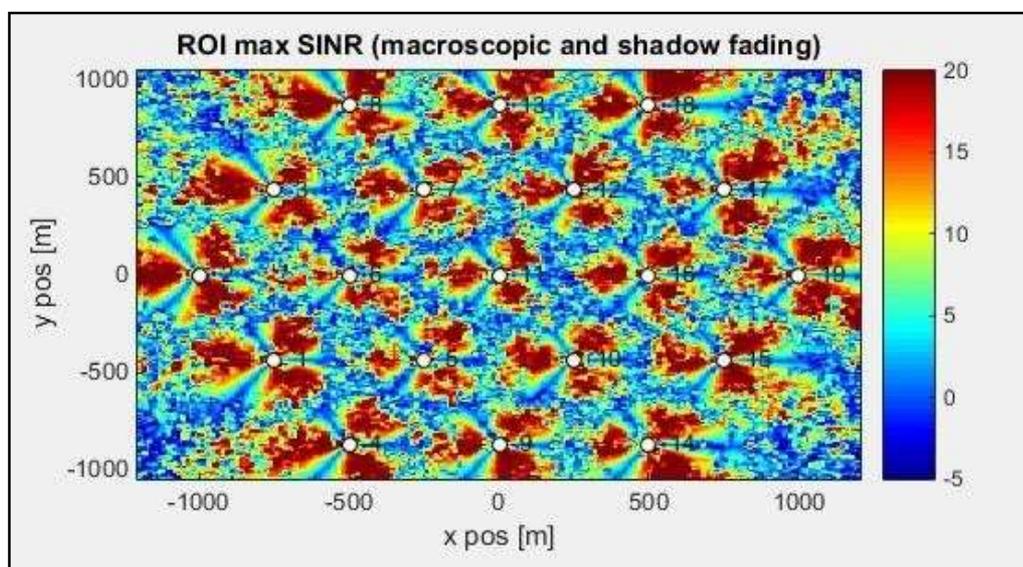
percurso do sinal. Infelizmente a simulação mostrada na Figura 17, não é disponibilizada pelo simulador quando se altera a posição dos *eNodeBs*.

Figura 16 – Mapa da propagação do sinal considerando apenas o efeito *fading*.



Fonte: Autor.

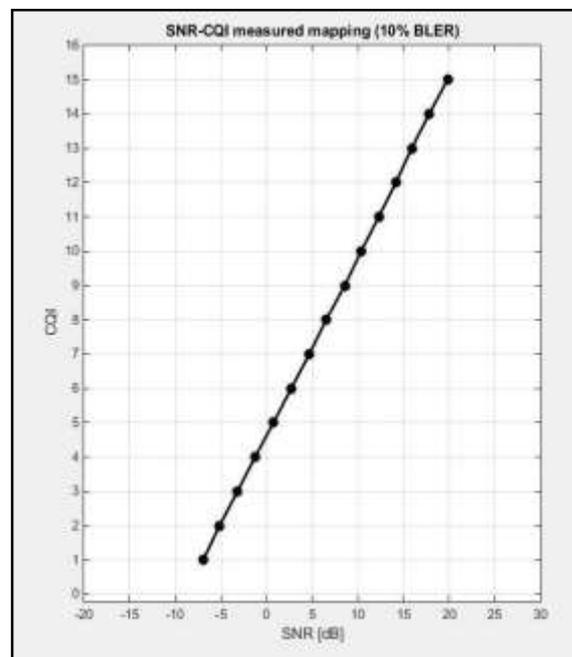
Figura 17 – Mapa da propagação do sinal considerando o efeito *shadow fading*.



Fonte: Autor.

Pode-se verificar, através da Figura 18, o comportamento de um dos parâmetros de qualidade, o CQI. Sendo que este parâmetro é muito importante para os *eNodeBs* escolherem melhores esquemas de modulação e outras configurações, buscando o melhor desempenho do sistema. (CARRASCO, 2011).

Figura 18 - Gráfico do mapeamento do indicador de qualidade de canal dependendo do valor da relação sinal/ruído.

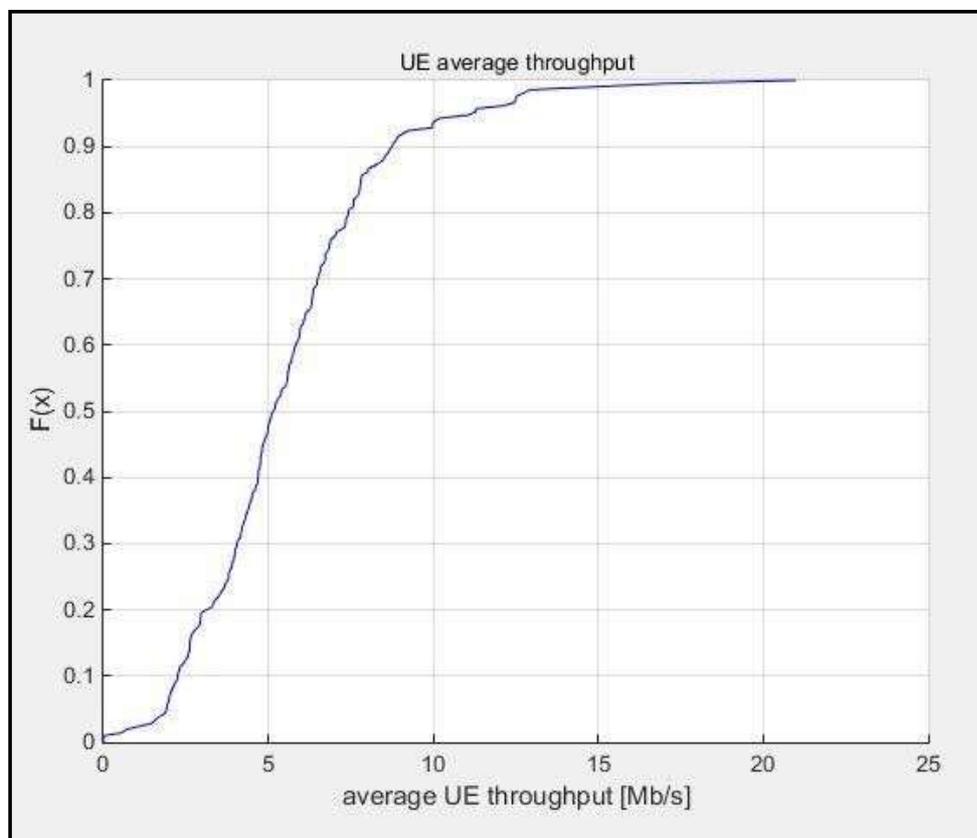


Fonte: Autor.

Analisando a Figura 18 percebemos que a relação sinal/ruído e o índice de qualidade do canal apresentam proporcionalidade, ou seja, quanto maior a relação sinal/ruído maior será o CQI, o que aumenta a quantidade de dados recebidos pelo usuário.

Outro gráfico importante gerado pelo simulador está demonstrado na Figura 19, através dele podemos avaliar no conjunto de células selecionado o comportamento da taxa de transferência média com relação à quantidade de usuários que estão acima ou abaixo de um determinado valor.

Figura 19 – Gráfico da quantidade de usuários e taxa de transferência média do conjunto de células.



Fonte: Autor

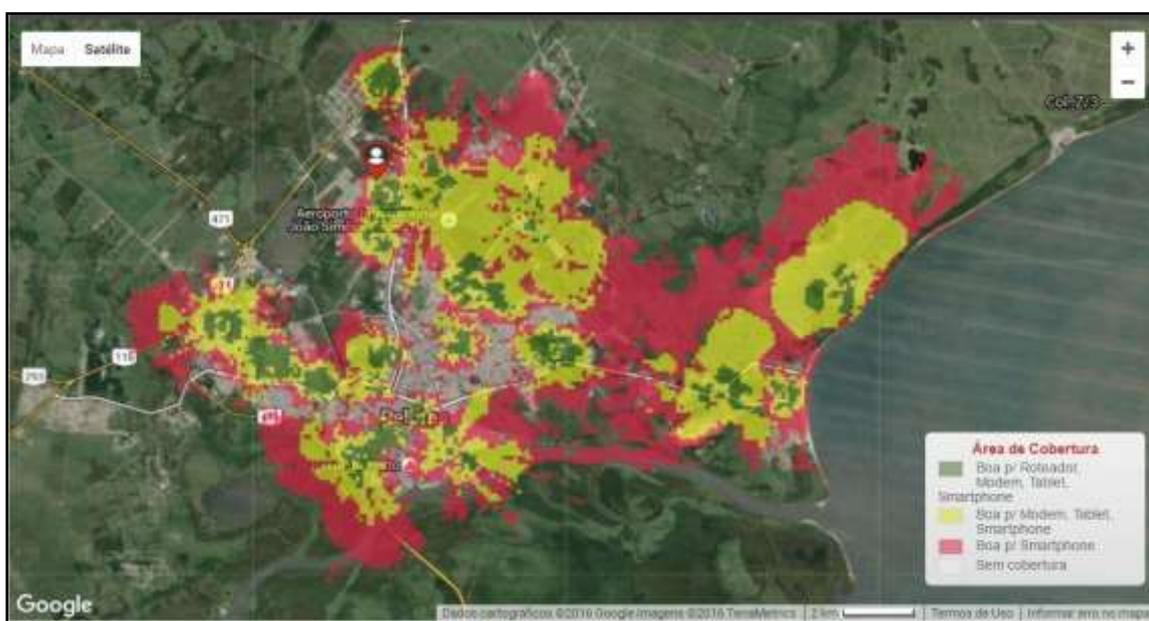
5.2 Simulação do estudo de caso

O estudo de caso que será apresentado, tentará chegar o mais próximo possível da cobertura da rede 4G da empresa Claro no centro da cidade de Pelotas. A simulação reproduzirá

um ambiente contendo os usuários de serviço móvel acessando a rede em vários serviços.

A cobertura de rede 4G realizada pela empresa Claro na cidade de Pelotas é mostrada na Figura 20.

Figura 20 – Mapa da cobertura da empresa Claro na cidade de Pelotas.

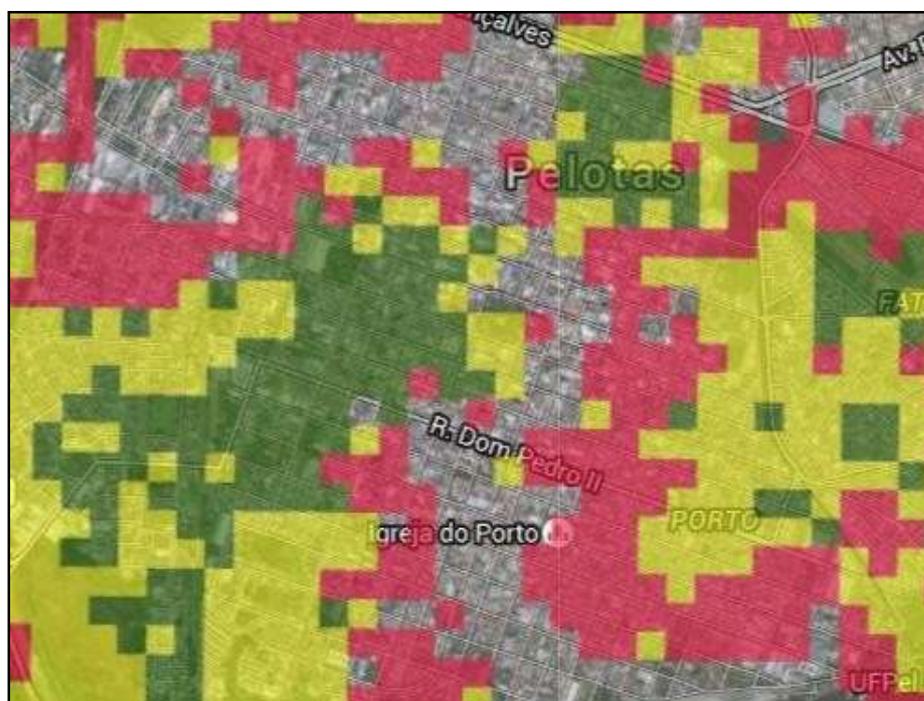


Fonte: CLARO, 2016.

A cidade de Pelotas é, predominantemente, uma cidade baixa e plana, o que facilita a propagação do sinal emitido pelas antenas. Porém como pode ser observado na Figura 20, existem algumas áreas onde não existe cobertura de sinal, como é o caso de alguns pontos no centro da cidade. Isto se dá principalmente pelo efeito de sombreamento causado por prédios e grandes construções. O fato destes pontos não possuírem boa cobertura acarreta em insatisfação dos clientes e sobrecarregamento da rede, tendo em vista que o centro de Pelotas é uma área com grande densidade populacional.

Para este estudo será considerada uma área de aproximadamente 4km², no centro da cidade, onde se espera posteriormente propor métodos de melhorias na qualidade da cobertura, eficiência da rede e conseqüentemente na satisfação do cliente. A Figura 21 demonstra a área de estudo.

Figura 21 – Mapa da cobertura da empresa Claro no centro da cidade de Pelotas



Fonte: CLARO, 2016.

A primeira simulação foi efetuada de forma a reproduzir, da melhor forma possível, a área de estudo e avaliar o comportamento de carga do sistema, onde foram efetuadas diversas simulações aumentando o número de usuários por célula. Os dados avaliados foram:

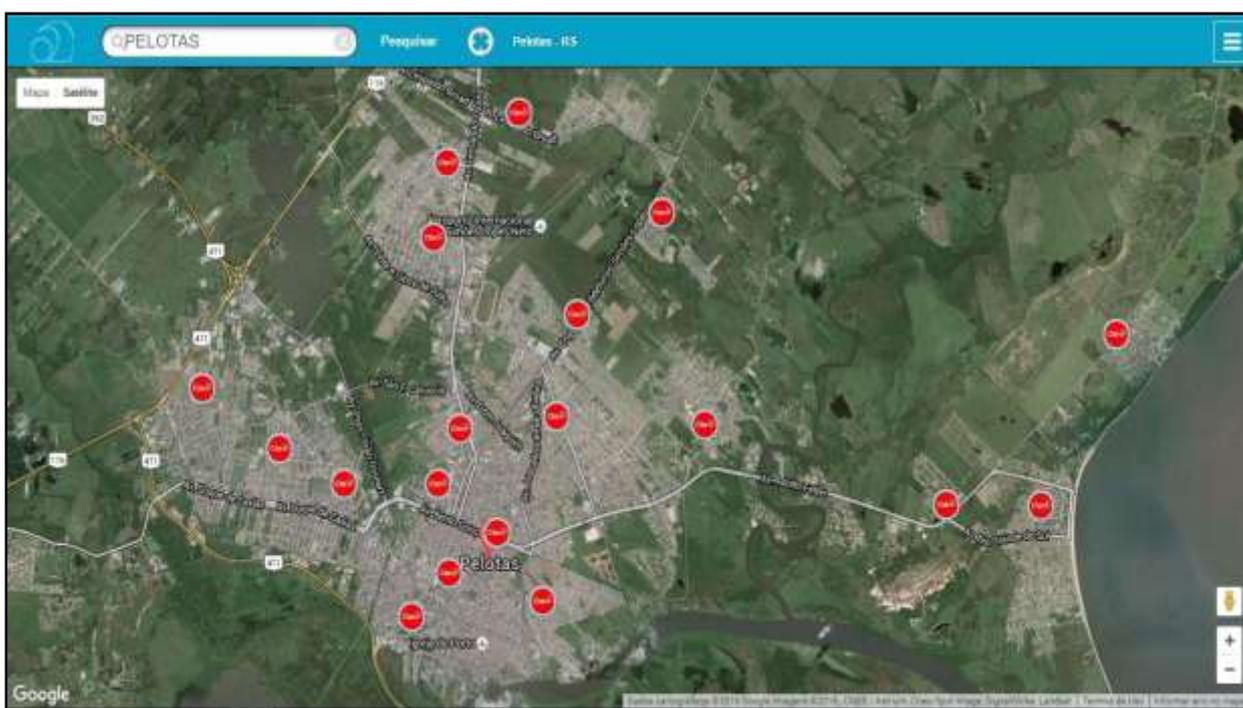
- a) percentual de usuários que possuem taxa de transferência acima de 2Mb/s;
- b) percentual de usuários que possuem taxa de transferência acima de 4Mb/s;

- c) taxa de transferência média por usuário;
- d) percentual de ocupação dos blocos de recursos.

Para que a simulação se tornasse mais real, foi utilizado o aplicativo “Anatel Consumidor”, disponibilizado pela ANATEL, que informa exatamente qual a posição dos *eNodeBs* em Pelotas. Este aplicativo está disponível em (<http://gatewaysiec.anatel.gov.br/mobileanatel/>),.

A Figura 22 mostra o posicionamento dos *eNodeBs* que foram considerados para a simulação, cujos dados foram obtidos através do “Anatel Consumidor”.

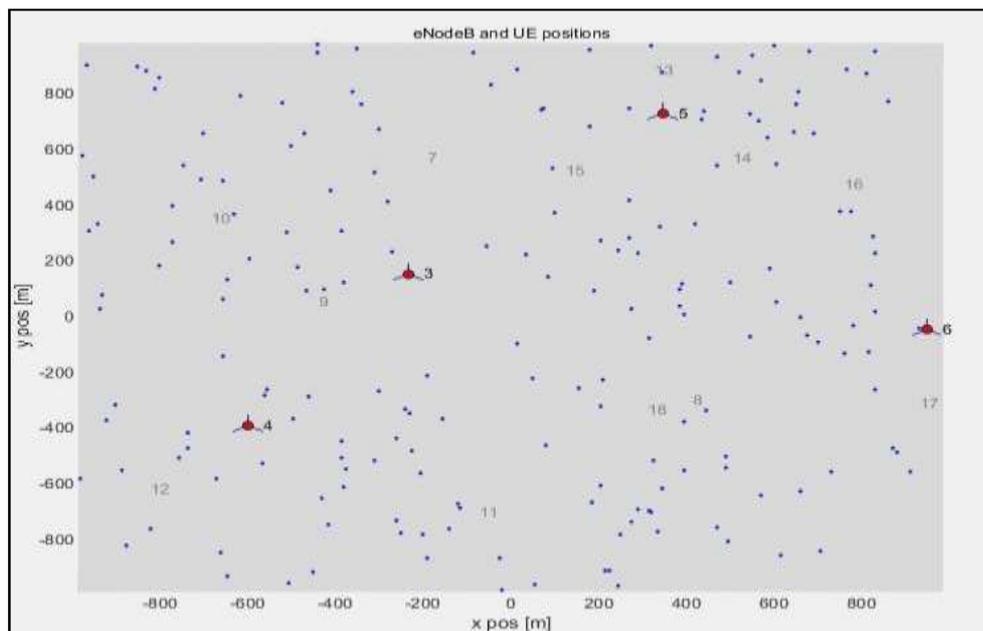
Figura 22 – Mapa do posicionamento do *eNodeBs* em Pelotas.



Fonte: ANATEL, 2016.

A Figura 23 mostra o mapa com a distribuição dos *eNodeBs* e usuários, de onde sairão os dados para avaliação da rede.

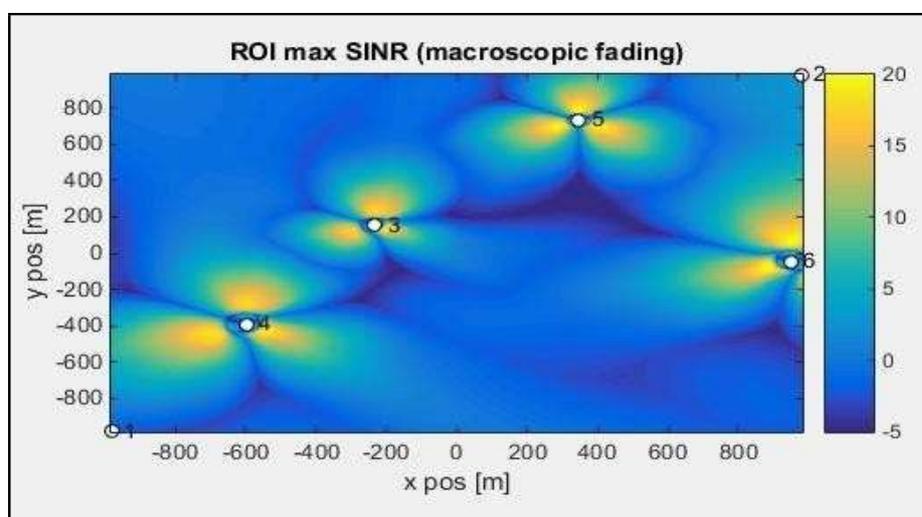
Figura 23 – Mapa da região de estudos de onde sairão informações sobre a rede.



Fonte: Autor.

A Figura 24 mostra a cobertura gerada no simulador. Tendo em vista que o simulador permite apenas a simulação considerando o efeito *fading*, ou seja, a degradação do sinal por conta de construções não é considerada na simulação.

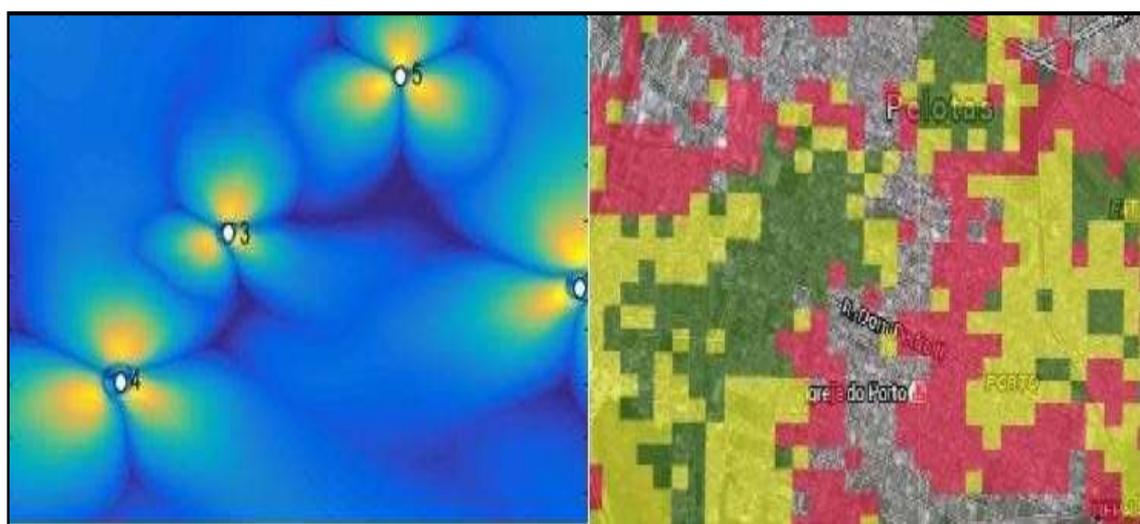
Figura 24 – Mapa da cobertura gerada pelo simulador.



Fonte: Autor

A comparação do sinal gerado pelo simulador e o sinal apresentado pela Claro é mostrada na Figura 25.

Figura 25 - Comparação entre o sinal simulado e o sinal disponibilizado pela Claro.



Fonte: Autor.

Os parâmetros avaliados na simulação, como taxa de transferência média, porcentagem de usuários acima de 2 e 4 Mb/s e percentual de ocupação dos blocos de recursos são mostrados na Tabela 10. Ocupação dos blocos de recursos foram coletados, pois são muito importantes quando se quer avaliar o desempenho do sistema mediante situação de sobrecarga (CARRASCO, 2011).

Tabela 10 - Tabela mostrando o comportamento do sistema conforme variação de usuários.

| Quantidade de usuários | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| Taxa de transferência média (Mb/s) | 4,1 | 2,38 | 1,97 | 1,72 | 1,23 | 0,98 | 0,81 | 0,5 | 0,32 | 0,19 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| % de usuários acima de 2 Mb/s | 83 | 57 | 46 | 34 | 23 | 15 | 5 | 1 | 0 | 0 |
| % de usuários acima de 4 Mb/s | 35 | 21 | 10 | 3 | 1,2 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| % de ocupação dos blocos de recursos | 94,8 | 95,1 | 97,8 | 97,9 | 98,3 | 98,4 | 99,13 | 99,5 | 99,6 | 99,6 |

Fonte: Autor.

Com base na Tabela 10 foram gerados gráficos que permitem avaliar o comportamento do sistema e, posteriormente, poder propor melhorias na transmissão e cobertura. Estes gráficos são apresentados na Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

Figura 26 – Gráfico demonstrando o comportamento da taxa de transferência média dos usuários de acordo com a quantidade de usuários presentes na região de interesse.



Fonte: Autor.

Baseados na Figura 26, podemos perceber que o nível de sinal recebido pelo usuário tem uma queda bastante significativa quando aumenta-se a quantidade de usuários conectados ao sistema. Inicialmente, quando temos 5 usuários conectados em cada célula, a taxa de transferência média por usuário é de 4,10 Mb/s. Porém, quando esse número é dez vezes maior, a taxa cai para 0,19 Mb/s.

Figura 27 – Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 2Mb/s.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com parâmetro fixo em 4Mb/s.



Fonte: Autor.

As Figuras 27 e 28 demonstram que aumentando a quantidade de usuários conectados à rede a taxa de transmissão cai abruptamente. Neste estudo, especificamente, a causa está relacionada à baixa qualidade de cobertura e baixa capacidade da rede. Para uma possível melhora na rede algumas ações podem ser adotadas. Uma delas está relacionada à instalação de femtocélulas, aparelhos que ajudam na capacidade de cobertura e principalmente no escoamento de carga das macroestações celulares.

Outra análise importante que pode ser feita do sistema diz respeito à ocupação dos blocos de recursos, pois como dito anteriormente esta informação é importante quando se quer

analisar o sistema em situação de sobrecarga. Na Figura 29 pode ser observado o comportamento deste parâmetro.

Figura 29 – Gráfico demonstrando o comportamento das características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis pelo sistema.



Fonte: Autor.

Pode-se verificar que com o aumento de usuários conectados ao sistema a ocupação dos recursos é praticamente total.

Uma das soluções para que haja uma melhora na cobertura de sinal e, também, da taxa de transferência em uma determinada localidade, é a utilização de femtocélulas. As femtocélulas são dispositivos semelhantes a repetidores de sinal que criam uma célula de menor dimensão sem alterar a configuração dos *eNodeB*'s originais.

Na próxima seção será abordado este tema, bem como simulações utilizando esta configuração.

5.2.1 Sistema com acréscimo de femtocélulas

Uma das alternativas que as operadoras de 4G possuem para melhorar sua eficiência em termos de cobertura e qualidade de sinal é o uso das femtocélulas. As femtocélulas são estações rádio base de menor tamanho quando comparadas às estações convencionais. Podem ser utilizadas em ambientes como: estádios, parques ou regiões urbanas onde se deseja melhorar o serviço oferecido.

As femtocélulas possuem baixa potência de transmissão, de 15 a 150 mW, atingindo uma área de cobertura de até 300 metros.

Na situação do estudo de caso, para que se obtenha uma melhora em relação à sobrecarga do sistema, podem ser inseridas diversas femtocélulas com objetivo de auxiliar no aumento da qualidade e capacidade da rede.

Para que seja possível avaliar o quanto se conseguiria de melhora com a inserção de femtocélulas, foram realizadas simulações considerando o mesmo cenário anterior, onde foram variadas as quantidades de usuários por células afim dese obter as estatísticas da rede anteriormente definidas.

A Tabela 11 mostra as estatísticas obtidas neste novo cenário contendo femtocélulas.

Tabela 11 - Tabela mostrando o comportamento do sistema conforme variação de usuários em um cenário com femtocélulas.

| Quantidade de usuários | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Taxa de transferência média (Mb/s) | 7,22 | 3,48 | 3,17 | 2,78 | 2,53 | 1,94 | 1,73 | 1,41 | 1,12 | 0,98 |
| % de usuários acima de 2 Mb/s | 99,8 | 81 | 73 | 51 | 38 | 18 | 11 | 5 | 2 | 1,1 |
| % de usuários acima de 4 Mb/s | 76 | 33 | 22 | 12 | 7 | 2 | 1,4 | 1,1 | 0,4 | 0,1 |
| % de ocupação dos blocos de recursos | 77,8 | 80,9 | 86,8 | 90,3 | 91,3 | 91,3 | 92,1 | 94,7 | 95,6 | 95,9 |

Fonte: Autor.

Conforme feito anteriormente foram gerados gráficos baseados na Tabela 11 para que se possa visualizar o comportamento do sistema com a inclusão de femtocélulas.

O gráfico que demonstra o comportamento da taxa de transferência média por usuário no cenário com femtocélulas está representado na Figura 30.

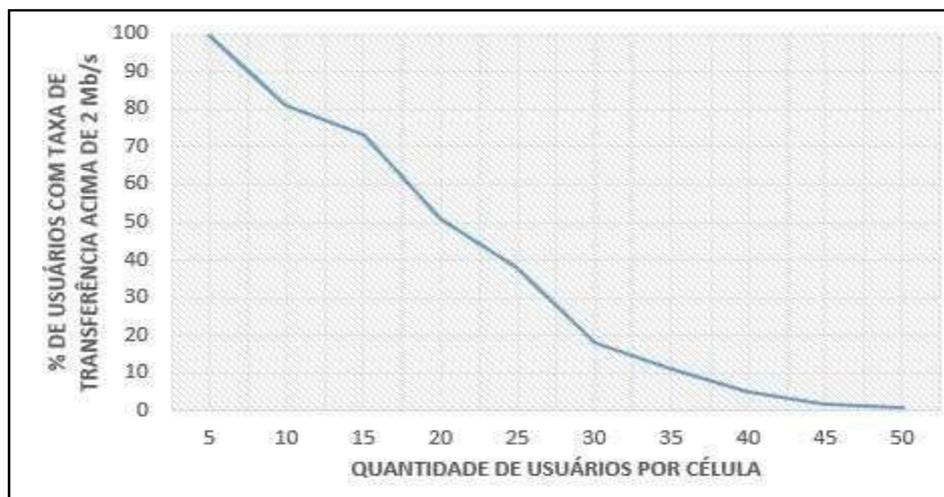
Figura 30 – Gráfico demonstrando o comportamento taxa de transferência média dos usuários de acordo com a quantidade de usuários presentes na região de interesse de um sistema com femtocélulas.



Fonte: Autor.

Os gráficos que demonstram a porcentagem de usuários acima de 2 e 4 Mb/s respectivamente, estão representados nas Figura 31 e 32.

Figura 31 - Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com femtocélulas comparâmetro fixo em 2 Mb/s.



Fonte: Autor.

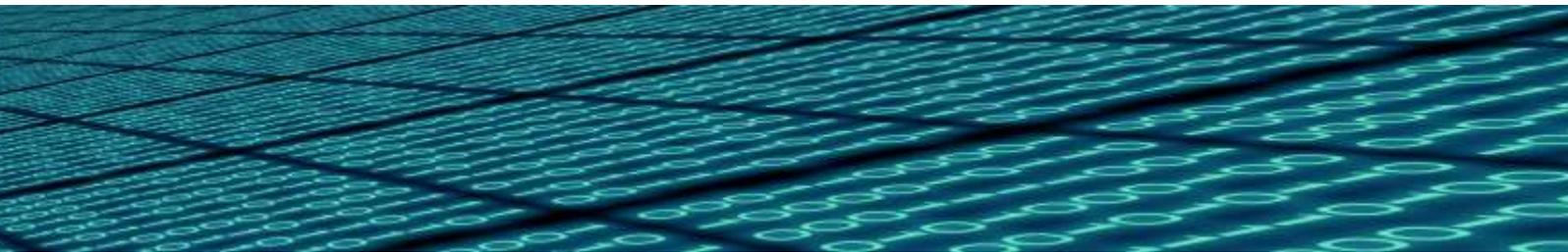
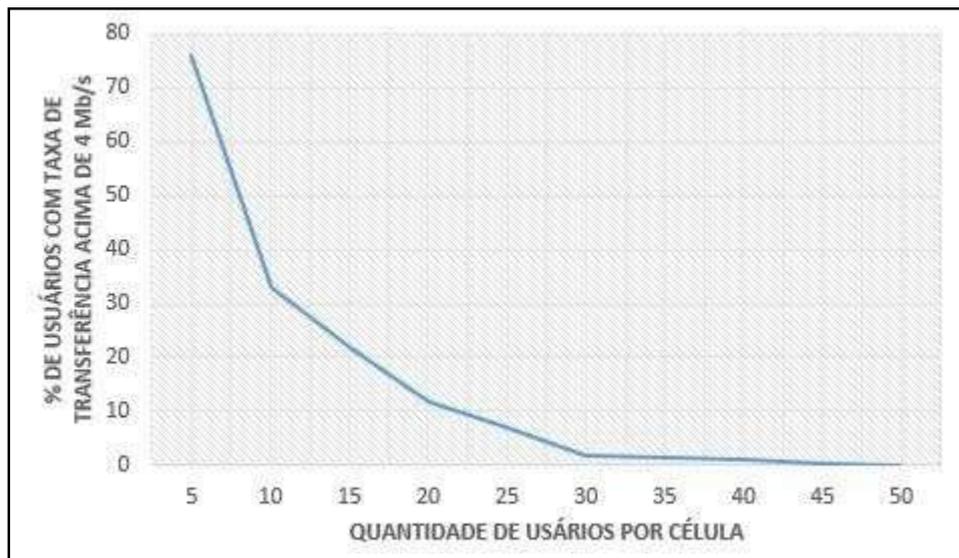


Figura 32 – Gráfico demonstrando o comportamento de carga do sistema com femtocélulas comparâmetro fixo em 4 Mb/s.



Fonte: Autor.

A Figura 33 demonstra o gráfico com a porcentagem de ocupação dos blocos de recursos do sistema.

Figura 33 – Gráfico demonstrando as características de ocupação dos blocos de recurso disponíveis em um sistema com femtocélulas.



Fonte: Autor.

Através de uma análise visual já é possível verificar uma significativa melhora em relação ao sistema sem femtocélulas, no entanto a seção seguinte irá fazer a comparação dos cenários de simulação onde se espera comprovar a eficácia do uso dessa técnica.

5.2.2 Comparação entre as simulações

Após serem feitas as simulações do estudo de caso proposto, considerando o sistema com e sem femtocélulas, foram gerados gráficos para que possa ser comparado o desempenho das duas redes considerando o sucessivo aumento de usuários. De forma a ilustrar de maneira mais clara as diferenças entre as simulações foram comparados os gráficos da Figuras 26 e 30 e o resultado é mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Gráfico demonstrando a comparação do comportamento de carga entre uma rede com e sem femtocélulas, analisando a taxa de transferência média dos usuários.



Para o caso das taxas de transferência média por usuário verificou-se um aumento médio de 1,22 Mb/s no sistema com a inserção de femtocélulas, evidenciando a melhoria para um sistema com sobrecarga de usuários.

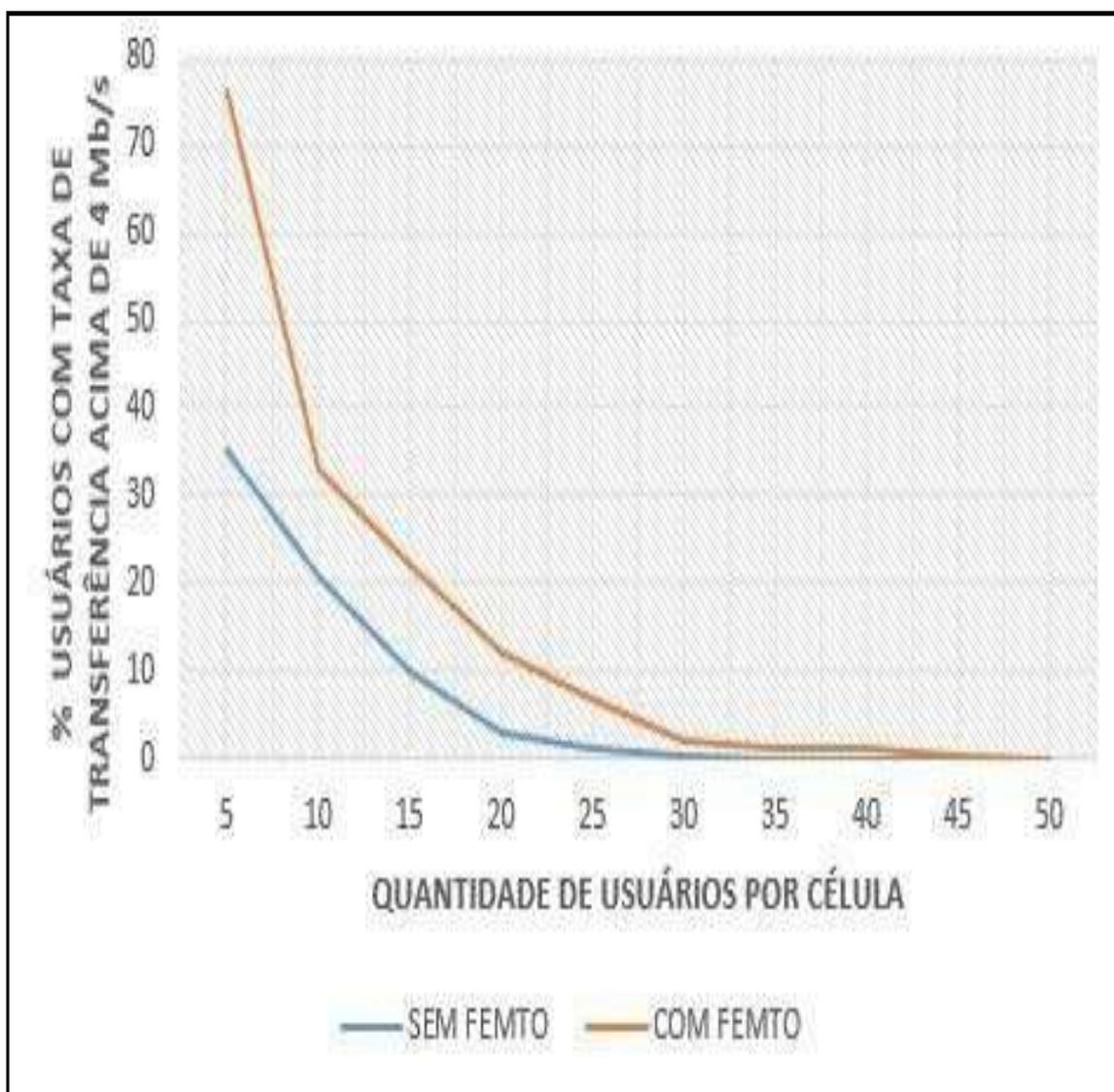
Da mesma forma foi feita a comparação entre outros dois parâmetros que estamos analisando. Nas Figuras 35 e 36, são demonstradas as diferenças medidas em relação a porcentagem de usuários que se encontram com taxa de transferência superior a 2 Mb/s e 4 Mb/s respectivamente.

Figura 35 – Gráfico demonstrando a comparação entre sistemas com taxa de transferência superior a 2 Mb/s



Fonte: Autor.

Figura 36 – Gráfico demonstrando a comparação entre sistemas com taxa de transferência superior a 4 Mb/s.

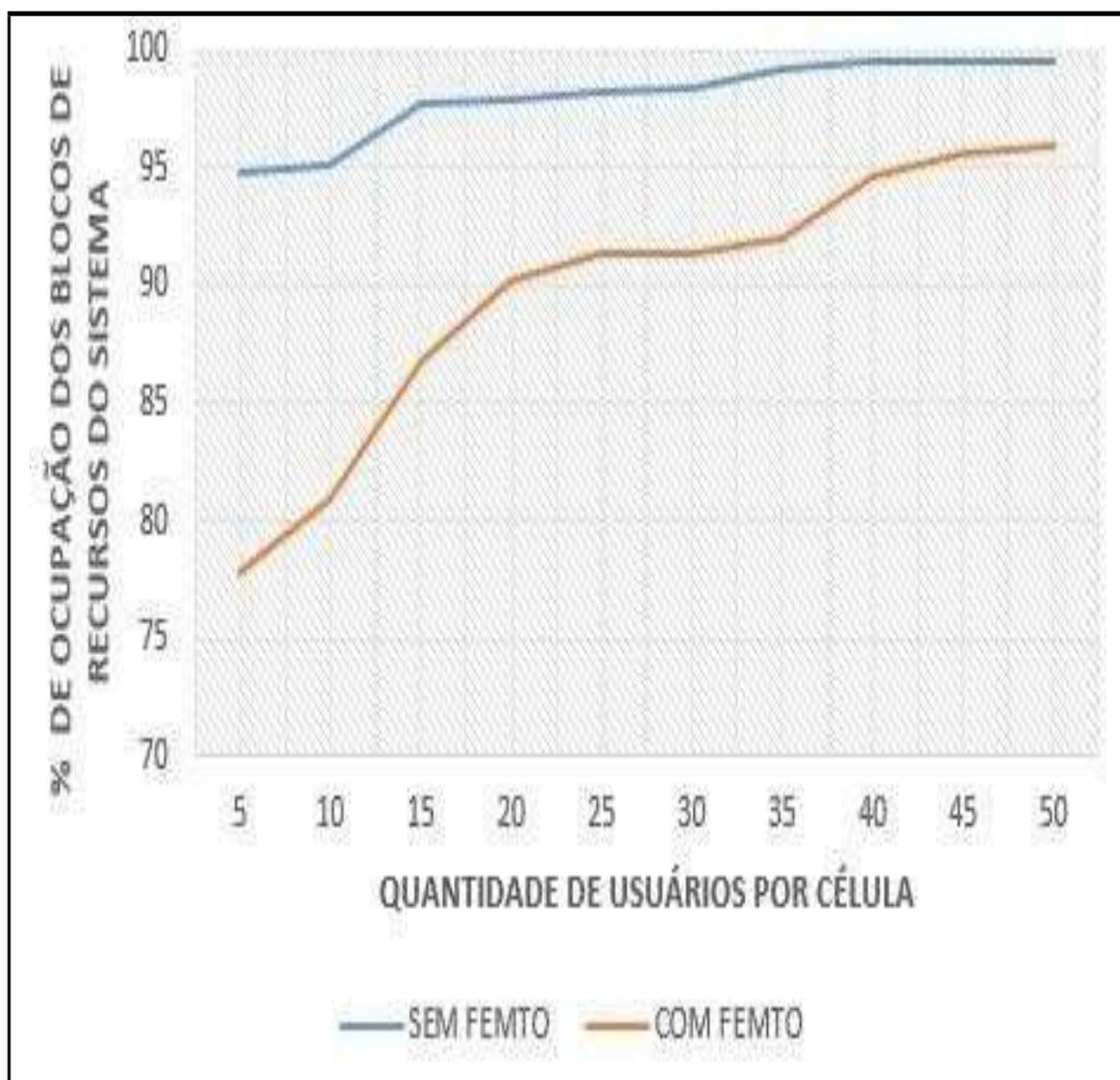


Fonte: Autor.

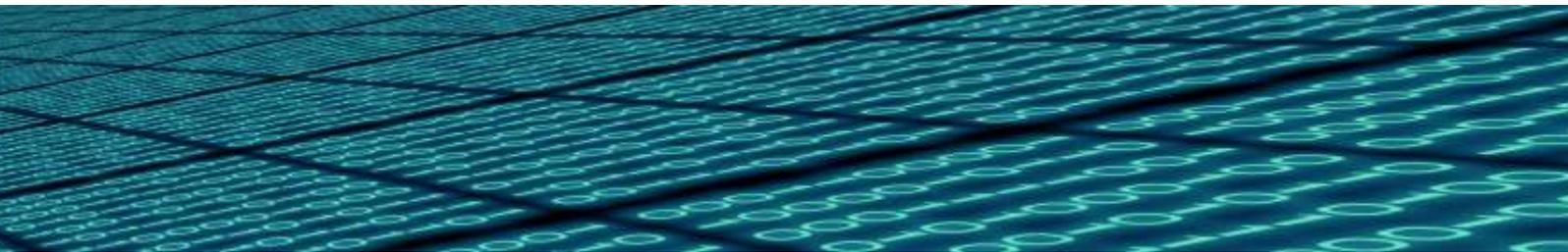
Em ambas análises, verificou-se uma significativa melhora na simulação que considera a inserção de femtocélulas, no entanto esta melhora foi mais considerável para uma quantidade de até 30 usuários por célula. A partir deste valor a diferença entre sistemas com e sem femtocélulas é menor.

Outra comparação feita diz respeito a ocupação dos blocos de recursos do sistema. Como já dito anteriormente essa medição é muito importante quando se quer avaliar o desempenho do sistema mediante situação de sobrecarga. A Figura 37 demonstra a comparação da porcentagem de ocupação do sistema entre osistema com e sem femtocélulas.

Figura 37 – Gráfico demonstrando a comparação das características de ocupação dos blocos derecursos disponíveis em um sistema com e sem femtocélulas.



Fonte: Autor.



O sistema com inserção de femtocélulas gera uma diminuição média no caso proposto de 8,34% de ocupação dos blocos de recursos do sistema, o que ocasiona em maior disponibilidade da rede e conseqüentemente maior satisfação do cliente.

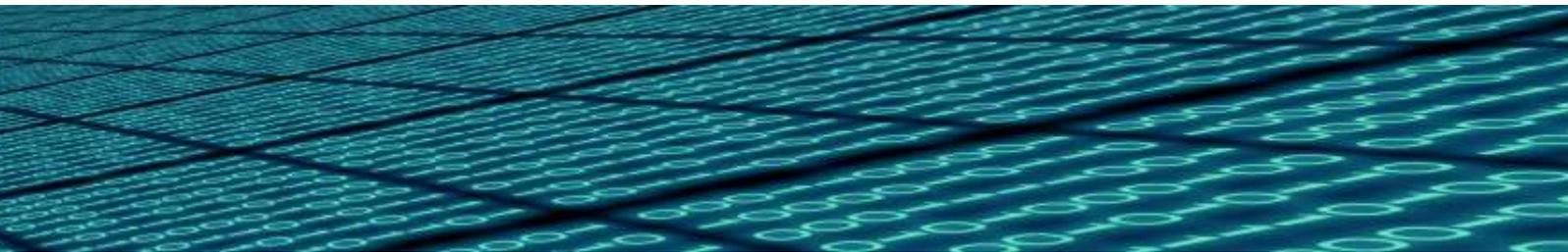
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nos últimos anos observou-se um crescimento elevadíssimo no mercado de aparelhos celulares e inovações nas tecnologias para as redes de comunicações móveis. Com isto, as demandas dos usuários alavancaram pesquisas para o surgimento de novas técnicas visando sempre aumentar a taxa de transmissão de dados e aumentar a capacidade de cobertura.

A evolução dos padrões é uma prova desta tendência desde a primeira geração. Com isso, as tecnologias passaram a se tornar parte essencial do contexto histórico humano. Nos dias de hoje, por exemplo, o acesso à *Internet* está incorporado ao cotidiano de grande parte da população.

Durante a realização do trabalho foi possível ter contato com as tecnologias mais desenvolvidas em termos de comunicação móvel. A tecnologia LTE demonstra grandes melhorias no aspecto de transmissão de dados principalmente devido ao fato de ser um serviço baseado em transferência de dados somente via *IP*. Alguns aspectos estruturais e funcionais do LTE foram abordados para que se pudesse entender, no momento em que fossem realizadas simulações, o que representavam os dados que haviam sido obtidos e quais seriam relevantes para o trabalho.

Como foi possível observar, a inserção de femtocélulas em uma área com grande densidade populacional como é o centro da cidade de Pelotas, melhora a robustez e capacidade do

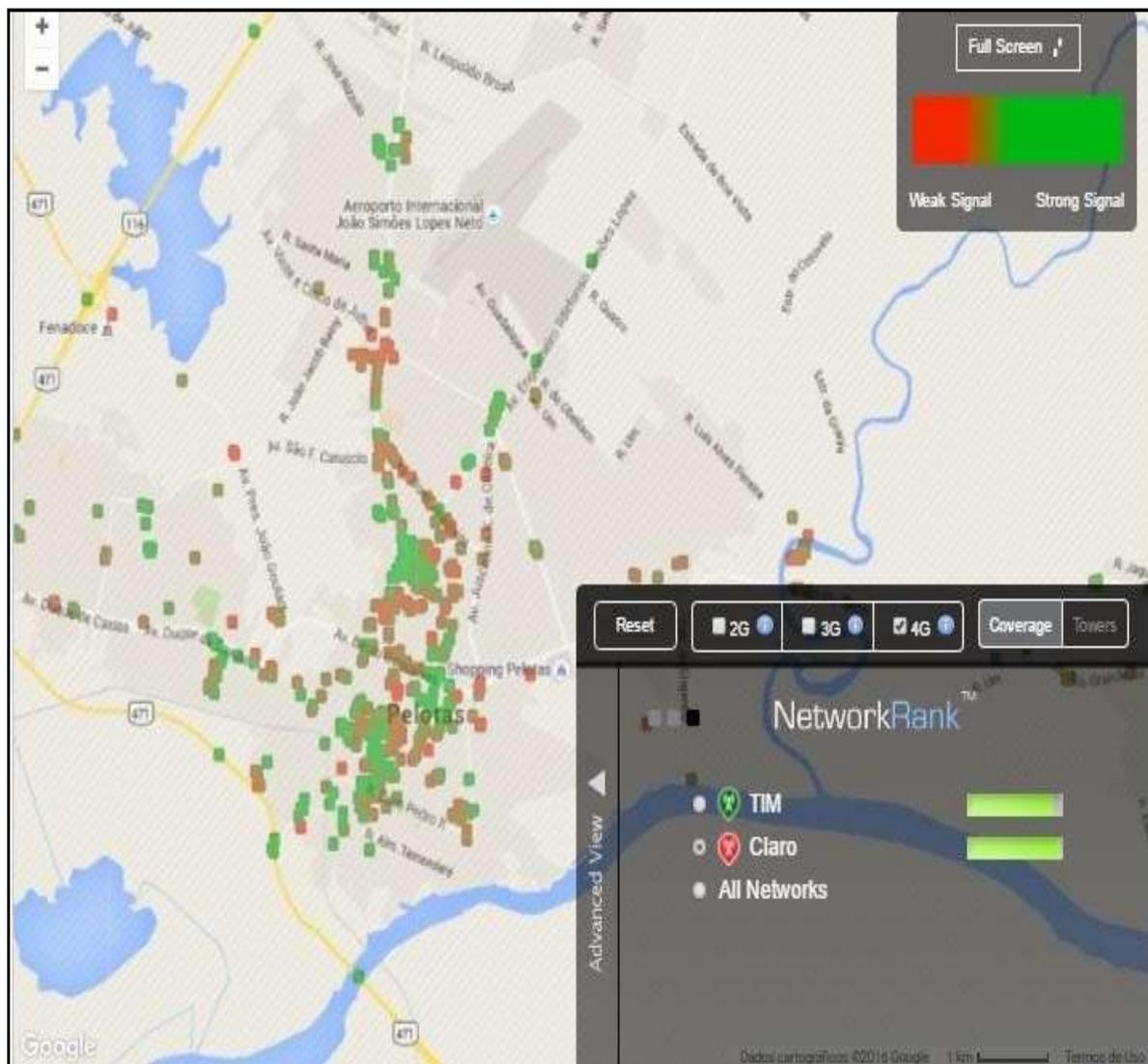


sistema, principalmente por ocasionar um maior escoamento do tráfego, não deixando assim que os *eNodeB's* fiquem sobrecarregados quando há um aumento na quantidade de usuários do sistema. No caso de um sistema com grandes dimensões como é o caso da área estudada, a proposta de melhoria consistiria em instalar uma maior quantidade de femtocélulas de modo que seja possível garantir a qualidade das taxas de transmissão e da cobertura do sinal, aumentando assim os indicadores de qualidade e conseqüentemente gerando uma maior satisfação dos clientes de uma determinada operadora.

A este trabalho pode ser acrescentado um estudo de qual seria o melhor posicionamento das femtocélulas na área avaliada e qual a quantidade exata necessária para que seja possível elevar a qualidade de serviços de 4G oferecidos pela Claro na cidade de Pelotas.

O site *opensignal.com* fornece uma medição interessante onde pode ser visualizada parte da cobertura oferecida pelas operadoras em uma determinada região utilizando os próprios aparelhos dos usuários. Um exemplo de mapeamento de sinal 4G da Claro na cidade de Pelotas baseado no sinal dos usuários que estão conectados à rede está mostrada na Figura 38.

Figura 38 – Figura demonstrando o mapeamento do sinal 4G na cidade de Pelotas.



Fonte: *OPENSIGNAL*, (2016).

REFERÊNCIAS

ANATEL, **Acesso a Comunicação Mutimídia**. 2016. Disponível em:

<<http://www.anatel.gov.br/dados/index.php/>>.

Acesso em: 11abr. 2016.

ANATEL, **Aplicativo Consumidor**. 2016. Disponível em: <

<http://www.anatel.gov.br/consumidor/index.php/canais-de-atendimento/aplicativo>>. Acesso em: 19 abr.

2016.

ARAGÃO, Joel O.; SALES, Tércio B. M.. **Sistema de telefonia móvel - terceira geração (3G)**. 2013.

Disponível em:

<<http://pt.slideshare.net/tarciosales/redes-3-grev1>>. Acesso em: 25 out. 2015.

CARRASCO, J. F. E. A. G. **Análise de desempenho dos sistemas LTE e LTE-Advanced com base em simuladores**.

Dissertação (Mestrado) — Universidade Técnica de Lisboa, 2011. Disponível em: <

<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143052365/Disserta%C3%A7%C3%20-%20Set2011%20-oJo%C3%A3o%2057940.pdf>> Acesso em: fev. 2016.

CARMO, Igor Santana do. **Cenários de Evolução para Acesso Banda Larga Sem Fio**. 2011. 77 f.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/>> Acesso em: jun. 2015.

CLARO, **Mapas de Cobertura**. Disponível em: <http://www.claro.com.br/celular/cobertura/regiao/ddd53/RS/cidade/> Acesso em: 27 de jun. 2016.

CORNELIO, José Bruno Maciel. **Inovações Tecnológicas no Setor de Telecomunicações no Brasil: Desafios e Oportunidades do LTE para expansão da Telefonia Móvel**. 2011. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração Pública e de Empresa, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2011.

DAHLMAN, Erick et al. **3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband**. 2.ed. San Francisco: Published By Elsevier Ltda, 2008.

FERNANDES, Diogo; CARVALHO, João. **Redes de Comunicação sem Fio**. 2014. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~projfeup/submit_13_14/uploads/relat_1MIEECO2_3.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2016.

FIGLIARESE, Virgílio. **Wireless - Introdução as Redes de Telecomunicações Móveis Celulares**. Rio de Janeiro: Brasport, 2005.

HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. **Sistemas Modernos de Comunicação Wireless**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

IBGE, **Censo demográfico**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>. Acesso em: 26 de jan. 2016.

IGLESIAS, Felipe dos Santos Cubo. **Análise da viabilidade de indicadores de infraestrutura e confiabilidade de redes móveis 4G**. 2014. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia

Eletrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <<http://bdm.unb.br/FelipedosSantos.pdf>> Acesso em jan. 2016.

KAZAMATSUJIGUSHI, Guilherme; MAIA JUNIOR, Marcos Antonio de Almeida; CONSOLI, Renan Dotta Pereira. **LTE: Simulação de cobertura e capacidade em Brasília.** 2013. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu//LTE_SIMULA%C3%83O_DE_COBERTURA_E_CAPACIDADE_EM_BRAS%C3%8DLIA> Acesso em dez. 2015.

MOTA, Tiago Andrade. **Redes 3G Evolução para as Redes 4G.** 2009. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriale4g/default.asp>>. Acesso em: 12 nov.2015.

NASCIMENTO, João Filipe Nunes do. **Análise de Desempenho em Redes Móveis Long Term Evolution (Parceria CELFINET).** 2012. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrônica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2181>> Acesso em mar. 2016.

OPENSIGNAL, **Coverage Map.** <Disponível em: <http://opensignal.com/>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

PASINATO, Marden Braga. **UMTS, HSDPA, HSUPA e LTE.** Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/marden/Introduo.html>. Acesso em: 12 out. 2015.

PEREIRA, Mirella M.; GUEDES, Leonardo G. de R. Perspectivas das Comunicações Móveis no Brasil. **Revista Digital Online**, Brasília, v. 2, n. 1, p.26-28, 02 jan. 2012.

PINHEIRO, Márcio Rodrigues. Planejamento de rede LTE utilizando aproximação híbrida de modelo empírico outdoor: Medição e técnica de algoritmo genético. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

PREGUIÇA, Ricardo de Figueiredo. **Comparison between UMTS/HSPA+ and WiMAX/IEEE 802.16e in Mobility Scenarios**. 2008. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Computer Engineering, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

RAPPAPORT, Theodore S.. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

ROLIN, Evandro Cherubini. **Análise da qualidade e do desempenho da cobertura celular Long Term Evolution em Curitiba**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <%20EVANDRO%20CHERUBINI%20ROLIN.pdf?s equence=1> Acesso em: nov. 2015.

RUMNEY, M. **LTE and the Evolution to 4G Wireless**. Agilent, 2009. Disponível em: <http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781119967927_sample_401172.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2016.

RAMOS, Manoel. **A evolução da telefonia celular**. 2011. Disponível em:

<<http://pt.slideshare.net/ManoelFelipeRamos/artigo-a-evolucao-da-telefoniacelular>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

SANTOS, Dom Medeiros. **História e Evolução dos Telefones Celulares** - CURIOSIDADE. Disponível em: <http://menudailha.blogspot.com.br/2015_02_01_archive.html>. Acesso em: 20 jan. 2016.

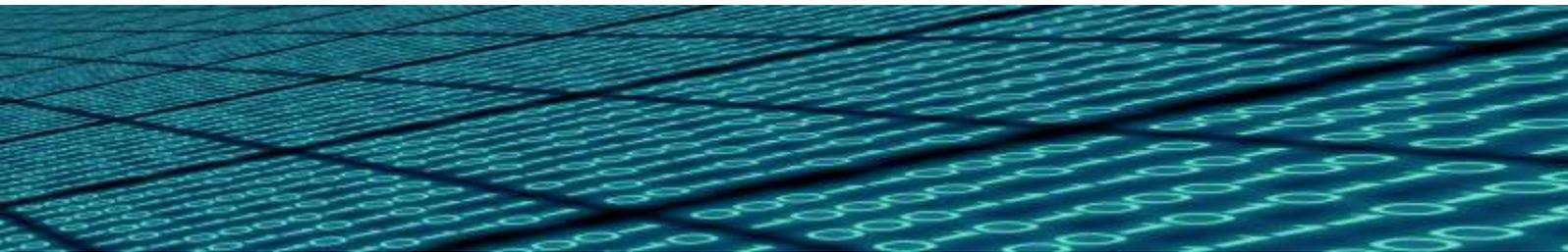
SVERZUT, José Umberto. **Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS - Evolução a Caminho da Terceira Geração (3G)**. São Paulo: Érica, 2005.

TAKEDA, Leonardo Naboru. **Evolução da Tecnologia Móvel até 2013**. 2013. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/121522>> Acesso em: ago. 2015.

TECMUNDO, **A Historia da evolução celular**. 2009. Disponível em: <http://www.tecmundo.com.br/celular/214-evolucao-do-celular.htm>. Acesso em: 04 mar. 2016.

TUDE, Eduardo. **AMPS/TDMA(IS-136): Arquitetura**. 2003. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialtdma.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2015.

WAGNER, Marcel Stefan. **Influência de protocolos de segurança sobre o desempenho de redes UMTS**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.



WIKIPÉDIA, **Roberto Landell de Moura**.
Disponível
em:<https://pt.wikipedia.org/wiki/Roberto_Landell_de_Moura>. Acesso em: 25 mar.2016.

5GAMÉRICAS, **LTE: 2T 2015 Américas**. 2016.
Disponível em: <<http://www.4gamericas.org/pt-br/resources/infographics/lte-2t-2015-americas/>> .
Acesso em: 15 mar. 2016.

5GAMÉRICAS, **Mobile Technology Statistics - Global**. 2016. Disponível em:<
<http://www.4gamericas.org/pt-br/resources/infographics/lte-2t-2015-americas/>> .
Acesso em: 15 mar. 2016.