

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
ENGENHARIA ELÉTRICA – TELECOMUNICAÇÕES

Yasmin Thuany Brito Barbosa

**ABORDAGEM HISTÓRICA, FUNCIONAL E  
PROJETO DE COBERTURA LTE (4G)  
PARA ARENA DA AMAZÔNIA**

Manaus – 2021

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B238a Barbosa, Yasmin Thuany Brito  
Abordagem histórica, funcional e projeto de cobertura LTE (4G) para  
Arena da Amazônia / Yasmin Thuany Brito Barbosa . 2021  
78 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ademir de Jesus Lourenço  
TCC de Graduação (Engenharia Elétrica - Telecomunicações) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. LTE-Long Term Evolution. 2. MIMO- Multiple Input Multiple Output.  
3. Radio Mobile. 4. Wimax . I. Lourenço, Ademir de Jesus.  
II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Yasmin Thuany Brito Barbosa

Abordagem histórica, funcional e projeto de cobertura LTE (4G) para Arena da Amazônia

Projeto Final de Curso, apresentado à UFAM como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira Eletricista com ênfase em Telecomunicações, sob a orientação do Professor Ademir Lourenço.

Aprovada em 30 de novembro de 2021.

*Ademir Lourenço*

---

Professor MSc. Ademir de Jesus Lourenço – Presidente e Orientador

DTEC – UFAM



---

DTEC – UFAM

*Celso Barbosa Carvalho*

---

Prof. Dr. Celso Barbosa Carvalho –

Membro DTEC – UFAM

# Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por ser sempre meu alicerce e guia. À minha Vó Elita (In memorian) que sempre foi meu maior exemplo de garra, fé e perseverança. Minha querida Mãe Joselma, que acreditou em mim e me motivou em toda minha trajetória, junto ao meu irmão Marcelo.

Dedico este trabalho também ao homem da minha vida, meu esposo Adriano, sem você eu não teria força para continuar minha caminhada. Sempre meu maior motivador, minha maior força e alegria, obrigada por ser meu companheiro de vida.

Ao meu professor orientador, Ademir Lourenço, pela paciência e por acreditar no meu sonho, me auxiliando e me motivando para assim tornar-me engenheira.

Aos meus amigos, Vanessa, Viviane, Lidia, Adelson, Leopoldino, Jones, Kevin, Alerrandro, Luiz, Inara, keyla, Carol e Ana. Minhas amigas de infância, meus colegas de graduação que se tornaram amigos, essa vitória também é de vocês.

Aos meus primos, que estiveram sempre me dando força nas minhas lutas, sintam-se presentes na minha vitória.

E finalmente, ao meu professor querido Ayres Mardem (In Memoriam), este que dedicou sua vida ao aprendizado dos seus alunos, o qual agregou tanto em minha vida, com valores e conhecimento.

# Resumo

Neste trabalho de pesquisa, desenvolve-se o estudo das tecnologias da Quarta Geração (4G), conhecendo a evolução da telefonia e suas aplicações.

Nos últimos anos, o aumento da demanda por serviços de dados nas redes celulares é algo expressivo. Aplicações utilizando dispositivos móveis para realizar altos dados de downloads de arquivos, acesso a internet, tornou-se essencial na vida de boa parcela da população mundial. A banda larga móvel é atualmente o serviço mais utilizado, usuários a todo momento trocando informações, foto, vídeos e vídeos chamadas em tempo real.

Neste cenário, torna-se imperativo que as redes móveis ofereçam altas taxas de transmissão aos usuários, além de uma grande cobertura para esses serviços. Inicialmente, teve-se as redes GSM (Global System for Mobile) e o UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) que não suportaram as novas demandas do mercado.

Foi atentando para essa necessidade que o sistema LTE (Long Term Evolution) foi projetado para melhorar a rede, conseqüentemente o throughput final do usuário, assim como a redução da latência. Então, oferecendo altas taxas de downlink e uplink, utilizando tecnologias de Acesso como OFDM (Orthogonal Frequency–Division Multiple Access) e com a evolução dessa tecnologia utiliza-se o MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), o qual aumenta a capacidade dos sistemas de Radiofrequência (RF). Assim, surgindo várias técnicas, como por exemplo o WiMAX que é uma tecnologia de acesso sem fio, que utiliza a cobertura em formato de células como na telefonia celular, assim sendo possível a transmissão da estação rádio base até, por exemplo, para dispositivos do usuário.

Este trabalho emprega essas premissas como motivação para se aplicar em simulações referentes a redes LTE utilizando o software Radio Mobile para que possa se visualizar a tecnologia.

**Palavras-chaves:** LTE, 4G, WiMAX, MIMO, Radio Mobile.

# Abstract

In this research work, the study of technologies of the Fourth Generation (4G) is developed, knowing the evolution of telephony and its applications. In recent years, the increase in demand for data services on cellular networks is something expressive. Applications using mobile devices to perform high data file downloads, accessing the internet, has become essential in the lives of a good portion of the world's population. Mobile broadband is currently the most used service, users all the time exchanging information, photos, videos and video calls in real time.

In this scenario, it becomes imperative that mobile networks offer high transmission rates to users, in addition to great coverage for these services. Initially, there were the GSM (Global System for Mobile) and UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) networks that did not support the new market demands.

It was with this need in mind that the LTE (Long Term Evolution) system was designed to improve the network, consequently the end-user throughput, as well as reducing latency. So, offering high rates of downlink and uplink, using Access technologies such as OFDM (Orthogonal Frequency–Division Multiple Access) and with the evolution of this technology, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) is used, which increases the capacity of Radio Frequency (RF) systems. Thus, emerging various technologies, such as WiMAX, which is a wireless access technology, which uses the coverage in cell format as in cellular telephony, thus making it possible to transmit the base station to, for example, user devices.

This work employs these premises as a motivation to apply it in simulations referring to LTE networks using the Radio Mobile software.

**Keywords:** LTE, 4G, WiMAX, MIMO, Radio Mobile.

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Sistemas Móveis da Primeira Geração .....	13
Tabela 2 – Sistemas Móveis da Segunda Geração. ....	15
Tabela 3 – Principais características do LTE.....	23
Tabela 4 – Frequências para FDD para LTE .....	28
Tabela 5 – Frequências de Operação para o TDD em LTE .....	29
Tabela 6 – Link Budget Downlink - Indoor .....	48
Tabela 7 – Link Budget Uplink - Indoor .....	49
Tabela 8 – Terrenos utilizados o Modelo SIU .....	49
Tabela 9 – Valores dos parâmetros do modelo SIU dos Terrenos.....	51
Tabela 10 – Parâmetros para capacidade da Rede .....	55
Tabela 11 – Dimensionamento de área de cobertura.....	57
Tabela 12 – Dimensionamento de cada <i>Site</i> .....	57

# Lista de Figuras

Figura 1 – Crescimento do tráfego de voz e dados nas redes WCDMA no mundo .....	18
Figura 2 – Usuários de Internet por Dispositivos Individuais, e total de usuários em % .....	18
Figura 3 – As Tendências de Serviços e as Tecnologias de acesso da rede móvel .....	20
Figura 4 – Backhaul em um link WiMAX .....	22
Figura 5 – Tráfego de Uplink e Downlink.....	22
Figura 6 – Arquitetura do EPS ( <i>Evolved Packet System</i> ).....	26
Figura 7 – Handover entre LTE e UMTS .....	28
Figura 8 – Frequências no LTE .....	29
Figura 9 – Estrutura dos Protocolos do LTE .....	31
Figura 10 – Modelo de um SAE <i>Bearer</i> .....	32
Figura 11 – Configuração do MIMO.....	33
Figura 12 – As três técnicas de transmissão MIMO .....	34
Figura 13 – Diferença entre OFDM e OFDMA.....	35
Figura 14 – Princípio de funcionamento do bloco IFFT/FFT .....	36
Figura 15 – Arquitetura LTE simplificada mostrando o OFDMA x SC-FDMA.....	37
Figura 16 – Estrutura de um frame no domínio do Tempo .....	38
Figura 17 – Atribuição de Subframes na estrutura no FDD.....	39
Figura 18 – Atribuição de subframes na estrutura no TDD .....	39
Figura 19 – Elementos de recurso de downlink exibidos na grade Tempo x Frequência .....	40



Figura 20 - Bloco de recurso de downlink no domínio da frequência.....	42
Figura 21 - Sinais de sincronismo inseridos em um bloco de recurso .....	43
Figura 22 - Estrutura de transmissão SC-FDMA .....	43
Figura 23 - Bloco de recurso de uplink no domínio da frequência.....	44
Figura 24 - Alocação de recursos no uplink .....	44
Figura 25 - Alocação de recursos de uplink utilizando saltos de frequência .	45
Figura 26 - Sinais de sincronismo de uplink .....	46
Figura 27 - Sinal SC-FDMA, com sinais de referência de uplink gerados a partir dos símbolos.....	46
Figura 28 - Deslocamentos circulares de uma sequência.....	47
Figura 29 - Arena da Amazônia.....	48
Figura 30- Parâmetro de sensibilidade da Recepção no App Gnet – Track Pro. ....	50
Figura 31- Área do estádio no Google Earth.....	55
Figura 32 - Área interna (gramado) no Google Earth.....	55
Figura 33- Parâmetros de solo no RM. ....	60
Figura 34 - Hierarquia dos sites no RM. ....	61
Figura 35- Parâmetros de Transmissão no RM.....	62
Figura 36 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 1 para Célula 2 no RM. ....	62
Figura 37- Verificação do Enlace com sentido da Célula 1 para Célula 3 no RM .....	63
Figura 38 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 1 para Célula 4 no RM. ....	63

Figura 39- Verificação do Enlace com sentido da Célula 2 para Célula 1 no RM .....	64
Figura 40 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 2 para Célula 3 no RM .....	64
Figura 41 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 2 para Célula 4 no RM. .....	64
Figura 42- Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 1 no RM. .....	65
Figura 43 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 2 no RM .....	65
Figura 44- Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 4 .....	65
Figura 45 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 4 para Célula 1 no RM. .....	66
Figura 46- Verificação do Enlace com sentido da Célula 4 para Célula 2 no RM. .....	66
Figura 47 - Verificação do Enlace com sentido da Célula 4 para Célula 3 ....	66
Figura 48- Área de Operação da Rede .....	67
Figura 49 - Relevo da área. ....	67
Figura 50- Arena da Amazônia com a Rede e Relevos no RM. ....	68
Figura 51- Projeto Completo da Rede LTE na Arena da Amazônia feito no RM e visualizado no Google Earth. ....	69

# Lista de Abreviaturas e Símbolos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
CDMA	Code Division Multiple Access
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EPC	Evolved Packet CORE
EPS	Evolved Packet System
ERP	Effective Radiated Power
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
EV-DO	Evolution-Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCI	Physical Cell Identity
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
P-GW	PDN Gateway
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude

QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RLC	Radio Link Control
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
S-GW	SAE Gateway
TDMA	Code Division Multiple Access
UE	User Equipment
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
RM	Radio Mobile

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
3.1 A EVOLUÇÃO DA COMUNICAÇÃO MÓVEL .....	15
3.1.1 A Tecnologia WiMax .....	22
3.1.1.1 Backhaul .....	23
3.2 A TECNOLOGIA DE QUARTA GERAÇÃO (4G).....	25
3.2.1 Objetivos do LTE .....	25
3.2.2 Arquitetura do Sistema LTE .....	27
3.2.3 Faixas de Frequências .....	30
3.2.4 A Interface de Rádio do LTE .....	32
3.2.4.1 Arquitetura da Interface de Rádio do LTE .....	32
3.2.5 MIMO (Multiple Input – Multiple Output).....	35
3.2.6 Múltiplo Acesso no LTE .....	37
3.2.6.1 Princípios do OFDMA.....	37
3.2.6.2 Princípios do SC-FDMA .....	39
3.2.7 Camada Física do LTE .....	39
3.2.7.1 Estrutura da Transmissão no Domínio do Tempo .....	40
3.2.8 Transmissão no Downlink e os Sinais de Sincronismo .....	42
3.2.8.1 Estrutura de Transmissão de Downlink .....	42
3.2.8.2 Sinais de Referência e Sincronismo de Downlink .....	43
3.2.9 Transmissão no Uplink e os Sinais de Sincronismo .....	44
3.2.9.1 Estrutura de Transmissão de Uplink.....	45
3.2.9.2 Sinais de Sincronismo de Uplink.....	46
<b>4 CENÁRIO DE TESTES E RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1 CENÁRIO DE TESTE: PROJETO DE COBERTURA E CAPACIDADE DA ARENA DA AMAZÔNIA UTILIZANDO REDES LTE ....	49
4.1.1 Etapas do Dimensionamento da Cobertura.....	50
4.1.1.1 Link Budget.....	50
4.1.1.2 Cálculo do Raio do Site .....	52
4.1.1.3 Parâmetros Utilizados no Projeto.....	54
4.1.1.4 Cálculo do Número de Sites Necessários para a Cobertura .....	55
4.1.2 Etapas de Projeto de Capacidade .....	57

<b>5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
5.1 RESULTADOS DA COBERTURA E DA CAPACIDADE.....	60
5.2 SIMULAÇÕES DE REDE NA ARENA DA AMAZÔNIA REALIZADAS NO SOFTWARE RADIO MOBILE .....	61
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>72</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>73</b>
7.1 PESQUISA SOBRE FERRAMENTAS E PROJETOS EM 5G .....	73
7.2 AGREGAÇÃO DE RESULTADOS EMPREGANDO O IOT .....	73
7.3 MELHORIA DA EXPERIÊNCIA DO USUÁRIO USANDO IOT E REDES MÓVEIS .....	74
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>75</b>

# 1 Introdução

A evolução das telecomunicações cresce de forma acelerada. O mundo vive em uma era de novos serviços, novos aparelhos e aplicações em que cada vez mais uma variável vem tornando-se imperativa: taxa de transmissão. Diante dessa realidade o mundo das comunicações móveis evoluiu chegando na Quarta Geração (4G) com o Long Term Evolution (LTE) (TELECO, 2012).

O Long Term Evolution (LTE) tem como principais requisitos sua alta eficiência espectral, altas taxas de dados de pico, tempo curto na comunicação, flexibilidade na frequência e largura de banda, e foi introduzido pelo 3GPP (3rd Generation Partnership Project), o qual une organizações de padrões de telecomunicações.

O presente estudo é uma abordagem prática-científica, utilizando simulações feitas a partir de estudos do LTE, sua funcionalidade e seus sistemas de irradiação. O objetivo principal deste é projetar os parâmetros de cobertura necessários para que os enlaces estejam em pleno funcionamento.

Buscou-se realizar esse trabalho como forma de mensurar qual a real necessidade de um bom planejamento para redes LTE. Para isso foi feito estudo de sistema, das técnicas de transmissão em ambiente aberto e da arquitetura do sistema de comunicações móveis. Por fim, há um estudo de caso que contempla o objetivo deste trabalho, no qual é feito o planejamento de cobertura para a arranjos de antenas para Arena da Amazônia.

Ao final deste, espera-se contribuir para a comunidade acadêmica, para que possa instruir na educação de outros futuros profissionais.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo Geral

⇒ Abordar o LTE de maneira histórica e funcional, utilizando técnicas e simulações de abordagem significativa para melhor entendimento dessa tecnologia aplicando em um projeto de cobertura e capacidade.

### 2.2 Objetivos Específicos

⇒ Abordagem histórica a evolução da comunicação sem fio;

⇒ Simular arranjos de antenas utilizando o Software Radio Mobile;

⇒ Planejar a cobertura e capacidade de arranjos de antenas LTE na arena da Amazônia como estudo de caso, utilizando o Software Radio Mobile.

## 3 Fundamentação Teórica

Nesta sessão, apresentam-se as tecnologias utilizadas neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), tais como evolução da comunicação sem fio, telefonia celular nas gerações 3G e 4G, Tecnologias da Geração 4G, Tecnologia WiMAX (WIMAXUFRJ), Padrão Long Term Evolution (LTE), MIMO e outros assuntos relacionados ao tema.

### 3.1 A Evolução da Comunicação Móvel

As comunicações móveis vêm tendo evoluções cada vez maiores nos últimos anos com o enorme crescimento do número de usuários, apoiado por um sistema cada vez mais acessível e inovador. Novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas em prazos menores e com grandes saltos tecnológicos.

O serviço de voz foi o precursor das redes de telecomunicações móveis que, utilizando a comutação por circuitos e técnicas de modulação analógica, trouxe ao mundo, no final da década de 70, um sistema que revolucionaria as



telecomunicações. A primeira geração de sistemas celulares dos Estados Unidos foi desenvolvida pela empresa Bell Labs em 1979, e ficou conhecida como AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*). Esta viria ser a tecnologia pioneira no Brasil e em grande parte do mundo, tornando-se o sistema analógico de maior imersão do mercado (GOSH, 2011).

A Primeira Geração (1G) foi iniciada com sistemas inteiramente analógicos e utilizavam uma técnica de Acesso chamada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), essa técnica se baseia na divisão de banda de frequência disponibilizada em faixas de frequências estreitas e que são alocadas em um único usuário durante todo tempo de chamada, o qual cada faixa tem 30KHz e somente possível tráfego de voz.

Os primeiros sistemas desenvolvidos foram o NMT (*Nordic Mobile Telecommunications*), AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), TACS (*Total Access Communications System*), ETACS (*Extended Total Access Communications System*), C450 e o Radicom 2000. (AL-SHAHRANI, 2009).

Pode-se observar os sistemas de Primeira Geração na Tabela 1, de acordo com suas frequências de transmissão e informações de largura de canais, números de canais e etc.

**Tabela 1** – Sistemas Móveis da Primeira Geração.

<b>PARÂMETROS DO SISTEMA</b>	<b>AMPS (EUA)</b>	<b>TACS (REINO UNIDO)</b>	<b>C450 (ALEMANHA OCIDENTAL)</b>	<b>NTT (JAPÃO)</b>
Frequências de Transmissão(MHz)	870-890	935-960	461,3-465,74 451,3-455,74	870-885 925-940
- base	825-	890-		
-Móvel	845	915		
Largura de Canal (kHz)	3	25	20	25

Espaçamento entre banda de transmissão e recepção (MHz)	45	45	10	55
Número de canais	666 (NES) / 832 (ES)	1000	222	600
Raio de cobertura da base (km)	2 - 25	2 - 20	5 - 30	5 (urbano) 10(suburbano)
Sinal de áudio -Modulação - $\Delta f$ máximo (kHz)	FM $\pm 12$	FM $\pm 9,5$	FM $\pm 4$	FM $\pm 5$
Sinais de controle -Modulação - $\Delta f$ (kHz)	FSK $\pm 8$	FSK $\pm 6,4$	FSK $\pm 2,5$	FSK $\pm 4,5$
Taxa de transmissão de dados (kpbs)	10	8	5,28	0,3

Fonte: Adaptação de SILVA, 2010.

No decorrer dos anos, novas tecnologias foram surgindo. Foi então que surgiram modulações digitais cada vez mais modernas, assim como equipamentos de transmissão cada vez melhores, aparelhos celulares mais tecnológicos e mais seguros. Foi então que vieram tecnologias de Segunda Geração (2G), datado no início dos anos 90, dentre as quais incluem o GSM (*Global System for Mobile Communications*), o IS-95 CDMA (*Code Division Multiple Access*), e os IS-136 TDMA

(*Time Division Multiple Access*), também conhecido como a evolução do AMPS, ou o D-AMPS (*Digital AMPS*).

A Segunda Geração (2G) se deu à chegada de maior qualidade nas ligações, maior segurança justamente por conta da utilização do SIM Card (*Subscriber Identity Module*), e os preços mais acessíveis aos usuários, tanto na taxa de serviço, quanto na aquisição de aparelhos. Além de oferecer muitas outras vantagens, como a utilização de técnicas de codificação de voz mais poderosa, maior eficiência espectral, tráfego de dados na rede e informações transmitidas criptografadas, ou seja, melhor qualidade nas ligações.

Como resultado surgiram os sistemas conhecidos como GSM (*Global System for Mobile*), CT-2 e DET na Europa, o TDMA (*Time Division Multiple Access*), CDMA IS-95 (*Code Division Multiple Access*) na EUA e o PDC (*Personal Digital Cellular*) no Japão (CASTRO, 2009).

Na Tabela 2 pode-se observar as tecnologias da Segunda Geração, assim como as técnicas de modulação, técnicas de Acesso, largura de canais, entre outras tecnologias advindas dessa geração (TELECO).

**Tabela 2** – Sistemas Móveis da Segunda Geração.

<b>PARÂMETROS DO SISTEMA</b>	<b>IS-54 / IS-136 (EUA)</b>	<b>GSM (EUROPA)</b>	<b>IS-95 (EUA)</b>
Técnica de acesso	TDMA	TDMA	CDMA
Frequência de Transmissão (MHz) Base-móvel	869-894 / 824-849	935-960 / 890-915/ 1710-1785/ 1805-1880	869-894 / 824-849

Técnica de Duplexação	FDD	FDD	FDD
Largura de canal (kHz)	30	200	1250
Modulação	DQPSK	GMSK	BPSK/QPSK
Potência máxima média (mW)	600/200	2000/125	600
Taxa de Codificação de voz (kbps)	7,95	13	8 (variável)
Nº de canais de voz por portadora	3	8	-
Taxa de transmissão de canal (kbps)	48,6	207,833	-

Fonte: Adaptação de SILVA, 2010.

O grande propulsor do sistema de telecomunicações foi a comutação de pacotes, pois, fez-se necessário no tráfego de dados. Foi então, que teve a evolução da tecnologia 2G para o GPRS (*General Packet Radio Service / Enganced Data rates for GSM Evolution*), a qual possibilita esse tráfego de dados por pacotes para a rede de telefonia celular para que possa ser integrada à internet.

O GPRS permite taxa de dados de 115 Kbps e faz uso suficiente da largura de banda disponível com taxas de bits variável. É apropriado para serviços que utilizam transmissão por rajadas, devido sua capacidade de alocar dinamicamente os recursos (AL-SHAHRANI, 2009).

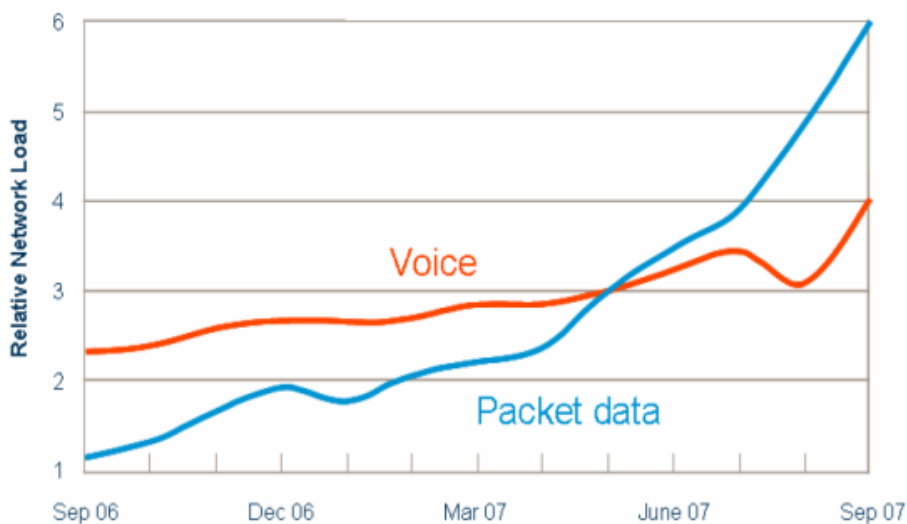
Posteriormente para as redes de terceira geração, como o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) ou EV-DO (*Evolution-Data Optimized*),

introduzem uma nova concepção de serviços ao sistema de telecomunicações: a internet banda larga móvel. Com ela, veio o suporte para aplicações e serviços avançados da rede de dados, incluindo serviços multimídia interativo com os usuários (SOARES,2014).

A terceira Geração (3G) chegou oferecendo serviços de comunicação de dados com altas taxas de *throughput* (taxa de transferência) e ainda tem maior imunidade a interferências do que as tecnologias anteriores. Nessa geração, os principais padrões são o **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunication System*) que é a evolução do GSM que utiliza como interface de rádio o WCDMA (*Wide-Band Code Division Multiple Access*) ou o EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) é essa tecnologia que possibilita altos níveis de consumo de banda, assim possibilitando serviços como streaming, transferência de grandes arquivos e videoconferências, tendo em vista que possui taxas que variam de 144 Kbps a 2Mbps.

O **CDMA 1xEV-DO** (*Evolution Data-Optimized*) é a evolução do CDMA, possui taxas de transmissão de dados de alta performance tendo picos de até 2,4 Mbps, a diferenciação dessa tecnologia está no *downlink* que usa a técnica TDMA e opera em 800 e 1900MHz. O **HSPA** (*High Speed Packet Access*) é o resultado de dois protocolos de telefonia móvel, o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) e do HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), portanto, podendo chegar até 14 Mbps no *downlink* e 5.8 Mbps no *Uplink*.

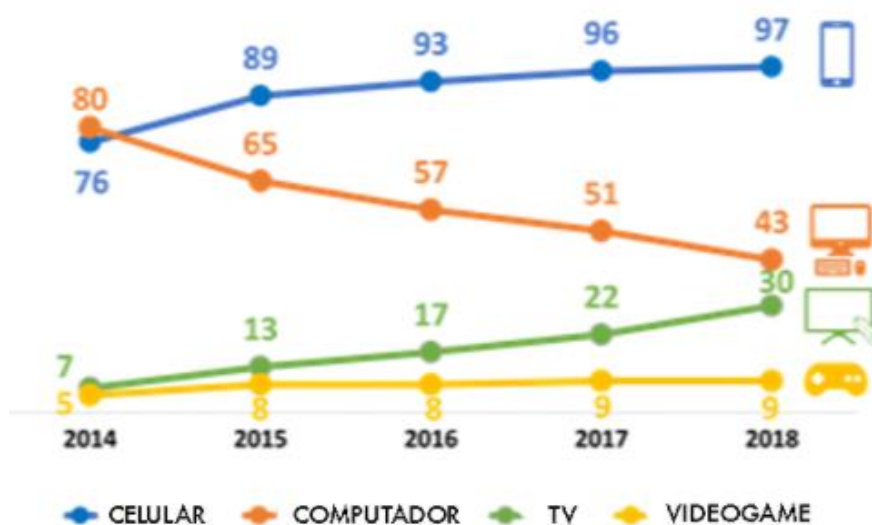
Toda essa evolução transformou significativamente o panorama das comunicações móveis. Em 2007, com a introdução do HSPA (*High Speed Packet Access*) nas redes WCDMA, já era possível constatar a superação da carga de dados sobre a de voz nas redes ao redor do mundo, conforme apresentado na Figura 1. Assim, as redes de serviços móveis já ofereciam maiores taxas aos seus clientes, e aplicações cada vez mais avançadas (ERICSSON, 2009).



**Figura 1** - Crescimento do tráfego de voz e dados nas redes WCDMA no mundo.

Fonte: Ericsson, 2009.

Esses avanços tecnológicos impulsionaram o crescimento acelerado do número de assinantes das redes celulares (TELECO2). Praticamente todos os serviços oferecidos pelas redes fixas de acesso a internet já eram oferecidas pelas redes 3G, porém, essa acumulava vantagem. É possível perceber o domínio expressivo das redes móveis sobre outras redes a partir dessas tecnologias citadas anteriormente, como pode-se observar na Figura 2, que mostra a quantidade de usuários de internet por dispositivo utilizado para acesso individual entre 2014 e 2018 e, porcentagem, onde podemos observar esses crescimento nítido, deixando os computadores usuais poucos utilizados.



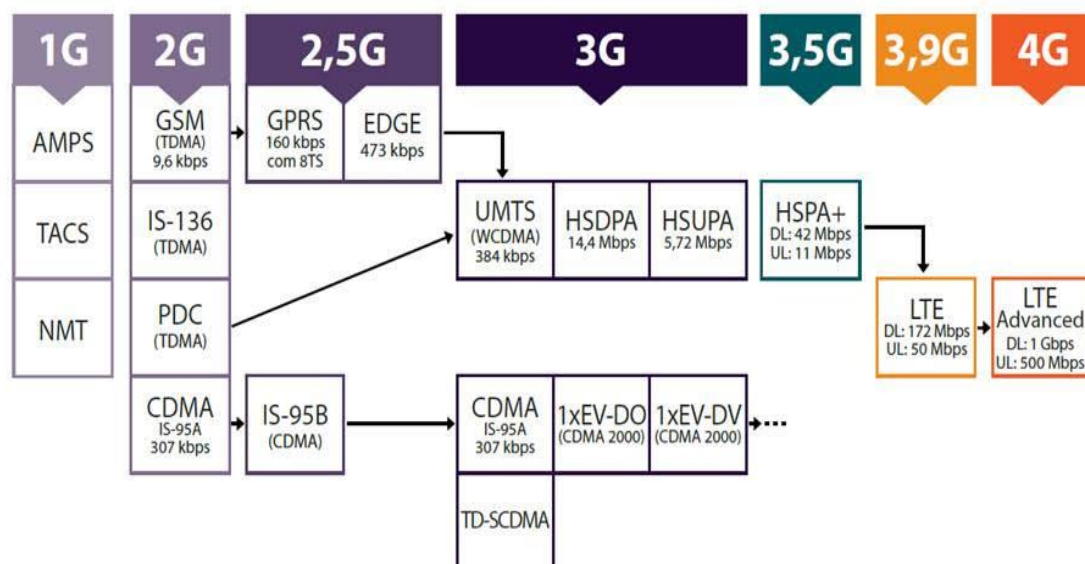
**Figura 2** – Usuários de Internet por Dispositivos Individuais, e total de usuários em %.

Fonte: Paiva, 2019.

O aumento do tráfego de dados nas redes IP aumentou consideravelmente com essas evoluções. A tendência de aplicações e serviços cada vez mais modernos exigia também uma banda larga móvel que oferecesse suporte ao fluxo de dados com as taxas das redes DSL (*Digital Subscriber Line*).

Assim em 2005, um grupo de pesquisadores do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), divididos em duas frentes, iniciou o trabalho de pesquisa e desenvolvimento de um novo padrão que atendesse a essa demanda. A primeira frente especialista em redes de acesso desenvolveu a e-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*), que se popularizaria comercialmente como a tecnologia de quarta geração LTE (GHOSH, 2012).

Na Figura 3 observa-se o panorama da evolução dos serviços oferecidos à medida que a rede móvel também evoluiu.



**Figura 3** - As Tendências de Serviços e as Tecnologias de acesso da rede móvel.

Fonte: Datatem, 2019.

### 3.1.1 A Tecnologia WiMAX

O WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é uma tecnologia muito interessante e importante, crucial citar, pois é similar a telefonia celular, a qual utiliza na cobertura a implantação em formato de células, mas é uma tecnologia de acesso sem fio (*wireless*). Essa tecnologia oferece acesso a banda larga a grandes distâncias que variam de 6 a 9 km, deste modo é possível a transmissão da estação rádio base para uma estação terminal de acesso a uma rede local, como por exemplo, uma rede wifi ou diretamente para o dispositivo do usuário (TELECO3).

Essa tecnologia foi desenvolvida para atender a necessidade de acesso à internet móvel (sem fio), com maior alcance que o Wifi convencional que acontece em quilometragem. Além disso, o WiMAX incorpora diversos avanços tecnológicos, sendo capaz de atender melhor diferentes requisitos de tráfego garantindo a qualidade na transmissão em ambientes metropolitanas (NOKIA, 2008).

O WiMAX não exige cabos, diminui o tempo de instalação, diminuindo os gastos das operadoras de serviço. Outra coisa muito importante sobre essa tecnologia é que permite o serviço de banda larga seja ofertado em lugares não atendidos por ser economicamente inviável, ou de alto custo, tais como regiões remotas e com pouca densidade de usuários, por exemplo, algumas cidades da Amazônia.

Um dos destaques dessa tecnologia é a agilidade, pois quando o cliente precisar de qualquer tipo de serviço, em um lugar que já exista uma BS (*Base Station*), ou seja, já é possível a ativação do WiMAX em período de tempo mínimo.

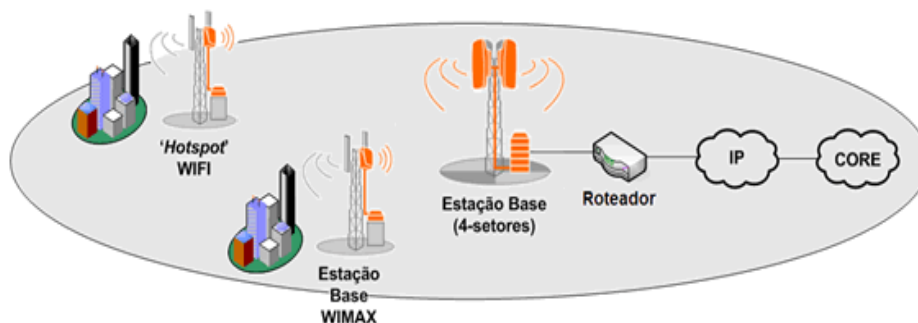
#### 3.1.1.1 Backhaul

É uma infraestrutura de suporte de conexão para a banda larga do STFC (*Serviço Telefônico Fixo Comutado*) que interliga as redes de acesso ao *backbone*. É uma tecnologia wireless que transmite dados e voz para um switch através de um site de uma célula e de um sistema central, para um remoto,



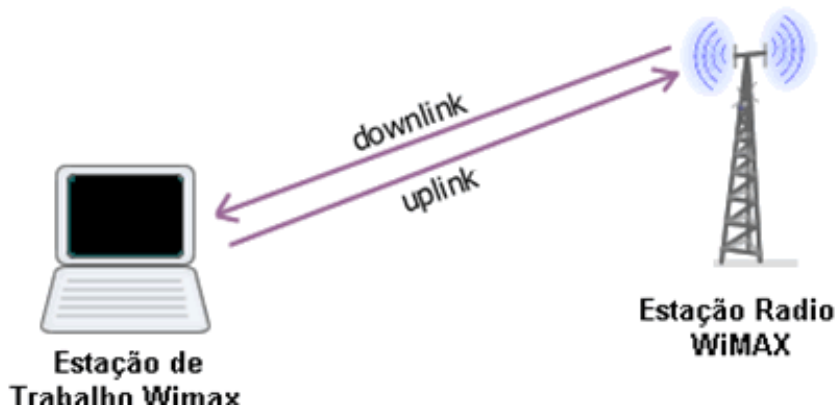
também utilizado em tecnologia de satélites, onde transmite dados para um satélite através de um ponto para o qual pode ser transmitido (*Uplink*) (TELECO, 2009).

Utilizada no WiMAX como transportador de dados, como se observa na Figura 4 que ilustra o link WiMAX.



**Figura 4** – Backhal em um link WiMAX. **Fonte:** Teleco, 2008

O WiMAX suporta dois tipos de multiplexação: TDD (*Time Division Duplexing*) e FDD (*Frequency Division Duplexing*), como se observa na Figura 5.



**Figura 5** – Tráfego de Uplink e Downlink. **Fonte:** INTEL, 2005.

## 3.2 Tecnologias da Quarta Geração (4G)

A Quarta Geração de redes móveis foi padronizada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) o qual, é uma associação de órgãos normativos de telecomunicações que visa a padronização mundial. Nessa Geração a tecnológica LTE (*Long Term Evolution*) é o padrão utilizado, que foi projetado para melhorar taxas de *throughput* do usuário, a capacidade, e reduzir a latência do plano do usuário.

### 3.2.1 Objetivos do LTE

Essa tecnologia tem como objetivo minimizar a complexidade do sistema e dos equipamentos dos usuários, permitindo a distribuição flexível do espectro através de novas frequências ou das faixas utilizadas. Foi implantada pra permitir a coexistência com outras redes já implantadas, como por exemplo o GSM. (TELECO, 2012).

Para se atender a primeira meta, o sistema conta com o que há de mais moderno em transmissão de dados em ambiente wireless. Sistemas de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), técnicas multi-antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), modulações de alta ordem e robustez (REIS). Já a baixa latência é alcançada graças ao novo sistema CORE da rede LTE, em que a quantidade de nós é consideravelmente reduzida graças a uma arquitetura mais simplificada e processamentos mais complexos nas eNode-B's (enhanced Node-B, estações rádio base no LTE) o que diminui significativamente o atraso de processamento do sistema (GHOSH, 2012).

Outra importante evolução do LTE foi o planejamento da rede para operar totalmente em domínio de pacotes, uma vez que não há mais comutação por circuitos no sistema. Assim, inclusive a transmissão de voz nas redes LTE é feita sobre IP, também conhecido como VoIP (Voz sobre IP) ou VoLTE (Voz sobre LTE). A Tabela 3 apresenta um resumo sobre as principais características dessa rede.

**Tabela 3** – Principais características do LTE.

<b>PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS</b>	
Pico da taxa de dados	DL: 100 Mbps / UL: 50 Mbps (para o espectro de 20 MHz).
Suporte a Mobilidade	A eficiência máxima encontra-se nas baixas velocidades 0-15 Km/h, mas pode chegar até a 500 Km/h.
Latência para o Plano de Controle	< 100 ms (do modo idle para ativo)
Latência para o Plano de Usuário	< 5 ms
Capacidade do Plano de Controle	>200 usuários por célula (para o espectro de 5 MHz).
Cobertura (Tamanho das células)	5-100 Km com pequena degradação após os 30 Km.
Espectro	1.25, 2.5, 5, 10, 15 e 20 MHz.

Fonte: 3GPP, 2010.

Assim o LTE agrega as melhores características dos outros sistemas em sua composição, seja usando o OFDMA como o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), ou o MIMO (*Multiple Input-Multiple*

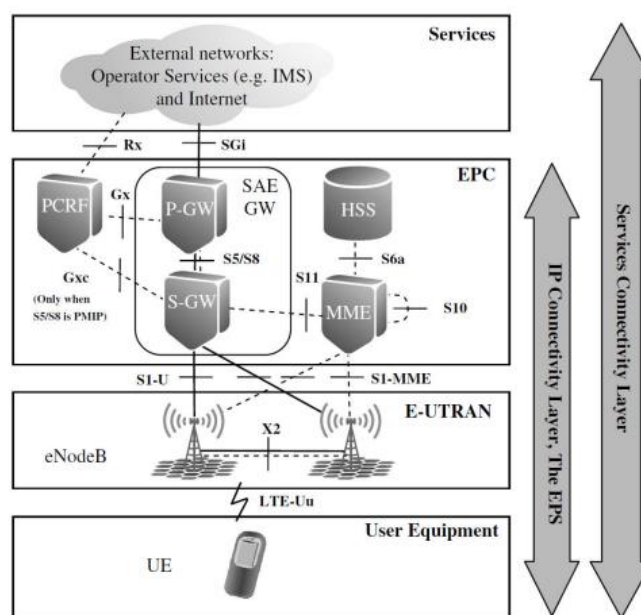
*Output*) tal qual o HSPA, ele oferece, alta eficiência espectral, robustez contra propagação por múltiplos percursos e alta afinidade para técnicas avançadas como o agendamento de domínio de frequência. Como apenas um nó concentra todas as tarefas da e-UTRAN, que é a eNode-B, obtém-se baixa latência do sistema de acesso e fácil compatibilidade com versões anteriores do 3GPP ou de outros sistemas não 3GPP. Suporta FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*) dentro de uma única tecnologia de acesso rádio e operação de redes SON (*Self Organizing Networks*) (SESIA, 2009).

### 3.2.2 Arquitetura do Sistema LTE

O sistema LTE foi projetado para operar somente no domínio de comutação de pacotes. Isso significa que a rede trabalha desde o acesso até o CORE sobre IP, visando uma melhor conectividade entre o UE (*User Equipment*) e o PDN (*Packet Data Network*), e garantindo que o serviço do usuário não sofrerá interrupções durante a conexão (TOSKALA, 2009).

O LTE (*Long Term Evolution*) focado no design de uma nova arquitetura para rede de acesso e interface ar, e o SAE (*Service Architecture Evolution*). Esta parte da rede está relacionada com as tarefas de controle e gerenciamento de usuários, sinalização, tarifação da rede, controle de fluxo de dados por usuário, etc. Trata-se da evolução do EPC (*Evolved Packet CORE*) chamado de SAE, que juntamente com o LTE forma o EPS (*Evolved Packet System*) (A. NUNES, 2011). Na Figura 6, observa-se a arquitetura da rede LTE.

Segundo D'ávila (2009), as principais diferenças na arquitetura LTE em comparação com as releases anteriores estão na supressão do RNC (Radio Network Controller) e no sistema baseado em IP. Os principais nós dessa nova arquitetura EPS são a eNode-B, o S-GW (*SAE Gateway*), o P-GW (*PDN Gateway*) e o MME (*Mobility Management Entity*). Além desses nós principais, há ainda outros nós como o banco de dados HSS (Home Subscriber Server) e o PCRF (*Policy and Charging Rules Function*). Esses nós formam a arquitetura básica de uma rede LTE que, quando conectadas a outras redes, apresentam novos Gateways e nós intermediários em sua estrutura.



**Figura 6** - Arquitetura do EPS (*Evolved Packet System*). Fonte: D'ÁVILA, 2009.

Nessa arquitetura as divisões dos nós lógicos do EPS são distribuídas de acordo com a funcionalidade de cada bloco, como segue:

⇒ **e-UTRAN** (*Evolved UTRAN*) - Consiste basicamente de eNode-B's que acumulam todas as funções da rede de acesso móvel. Faz o Gerenciamento dos recursos de Rádio, o que significa controlar os Radio Bearers (*Túneis lógicos entre o UE e o CORE*), o scheduling e a alocação dinâmica de recursos. Realiza ainda a compressão de cabeçalhos, criptografia, codificação, modulação, ARQ (*Automatic Repeat Request*) e H-ARQ (*Hybrid ARQ*), Handover, etc. (BAKER, 2009). Entre os nós de uma rede de dados são estabelecidas conexões lógicas chamadas de interfaces. A Enhanced NodeB do LTE (eNodeB) irá realizar o controle de tráfego na interface aérea assegurando QoS (*Quality of Service*) para os serviços.

⇒ **S-GW** (*SAE Gateway or Serving Gateway*) - Gerencia a mobilidade do plano de usuário e atua como buffer para os pacotes transmitidos no downlink. Promove a interligação entre a e-UTRAN e outras redes de acesso 3GPP's (GERAN ou UTRAN) com o EPC. Realiza ainda, o roteamento e o encaminhamento de pacotes, bem como o início dos procedimentos de requisição de serviços na rede (GHOSH, 2011).

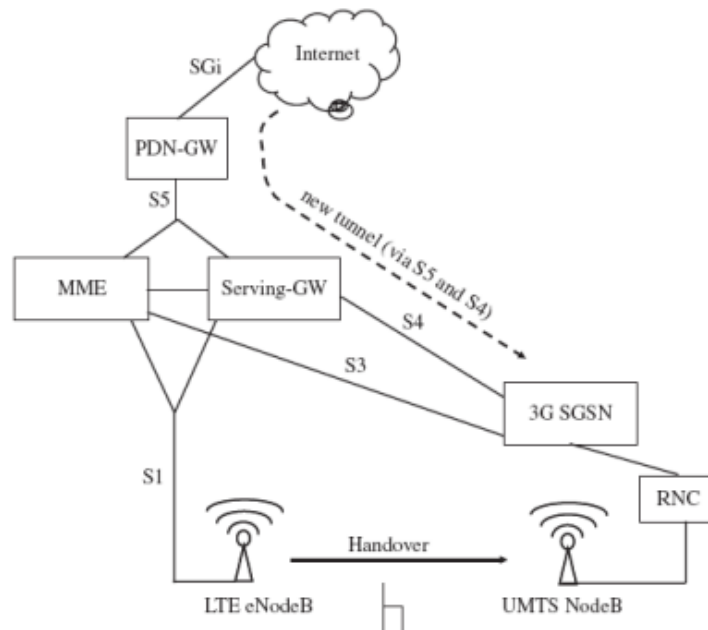
⇒ **P-GW** (*PDN Gateway*) - Atua como a interligação entre o EPC e outras redes de dados (PDN - *Packet Data Networks*), como a internet, redes IP privadas, redes não 3GPP's (CDMA200 ou WiMAX) ou redes IMS (*IP Multimedia CORE Network Subsystem*), provendo serviços aos usuários finais. Tem a função de alocar endereços IP's aos usuários, filtragem de pacotes para inspeção de aplicações e administração de políticas de alocação de recursos para o controle de taxa de dados, QoS e uso do sistema (GHOSH, 2011).

⇒ **MME** (*Mobility Management Entity*) - É o responsável pelo processamento da sinalização e controle entre o UE e o EPC. Gerencia a mobilidade do UE quando este está em idle mode, além de paging, roaming e o handovers. Provê funções de segurança como a atribuição de ID's temporários para os terminais de usuários (GHOSH, 2011).

⇒ **PCRF** (*Policy and Charging Rules Function*) - Responsável pela política de controle de decisão e pela gerência das funcionalidades de balanceamento de carga no PCEF (*Policy Control Enforcement Function*), localizado no P-GW. Controla ainda funcionalidades de QoS (*Quality of Service*) e de tarifação (BAKER, 2009).

⇒ **HSS** (*Home Subscriber Server*) – É a combinação dos dados dos usuários, sendo utilizado simultaneamente pelo GSM, UMTS e LTE. É considerado um Enhanced HLR (*Home Location Register*).

Pode-se observar na Figura 7 a comunicação entre o HSS e a MME é realizado pela interface S6.



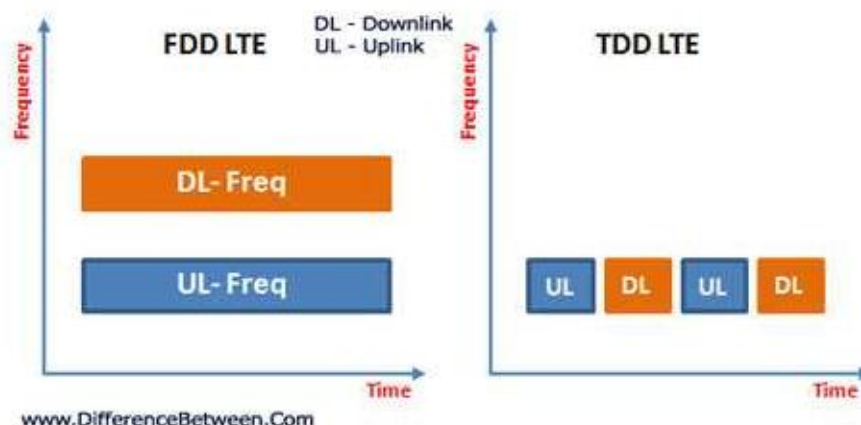
**Figura 7** – Handover entre LTE e UMTS. **Fonte:** Santos, 2010.

Como se observa na imagem acima, podemos dizer que o usuário está saindo de sua cobertura LTE, assim sendo que seu aparelho reportar para a eNodeB que outra célula de outra tecnologia foi encontrada (ex. UMTS/ GSM). Logo, essa informação é passada para o MME que automaticamente conecta e troca informações com a SGSN responsável, assim preparando outra rede preparada para receber, então o MME envia a mensagem de handover para assim o eNodeB conectar o móvel.

### 3.2.3 Faixas de Frequências

O padrão LTE utiliza as faixas de frequências de acordo com com seus modos de operação, que no caso, funciona tanto em FDD (*Frequency Division Duplex*) quanto em TDD (*Time Division Duplex*). Assim, são verificadas as frequências estabelecidas pela 3GPP. O padrão FDD (*Frequency Division Duplexing*) utiliza duas bandas separadas de freqüência, possibilitando o TM (Terminal Móvel) transmitir em uma freqüência (Link Direto - *Downlink*) e receber em outra (Link Reverso - *Uplink*) (CONNIC 2008).

Na Figura 8 podemos observar como as frequências se comportam no LTE.



**Figura 8** – Frequências no LTE. Fonte: DifferenceBetetween, 2017.

Podemos observar que o FDD usa o espectro emparelhado com diferentes frequências para transmitir (*Uplink*) e receber (*downlink*) sinais simultâneos, além de ter uma banda de guarda para que não haja interferência. Já no TDD é usado espectro desemparelhado justamente porque a frequência para transmissão e recepção é a mesma, assim, alocando diferentes intervalos de tempo como banda de guarda.

As frequências de operação definidas pela 3GPP em Maio de 2009 para o LTE são:

**Tabela 4** – Frequências para FDD para LTE.

<b>Bandas (LTE)</b>	<b>Frequência UL/DL (MHz)</b>
1	1920-1980 / 2110-2170
2	1850-1910 / 1930-1990
3	1710-1785 / 1805-1880
4	1710-1755 / 2110-2155
5	824-849 / 869-894
6	830-840 / 875-885
7	2500-2570 / 2620-2690



...(13)	746-758 / 776-788
---------	-------------------

Fonte: 3GPP, 2009.

Assim como para o FDD, o 3GPP também definiu as frequências para TDD, como observa-se na Tabela 5.

**Tabela 5** – Frequências de Operação para o TDD em LTE.

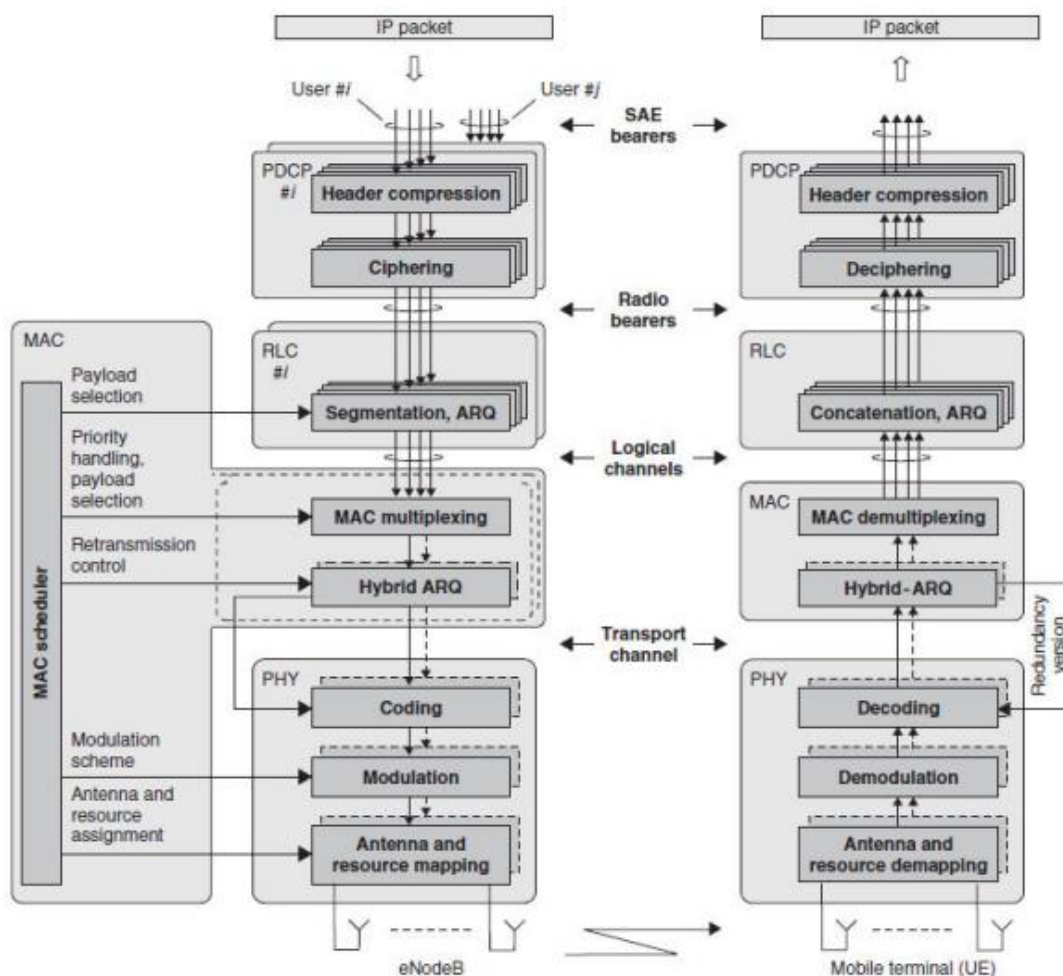
<b>Banda</b>	<b>Frequências UL/DL (MHz)</b>
33,34	1900-1920 / 2010-2025
35,36	1850-1910/1930-1990
37	1910-1930
38	2570-2620
39	1880-1920
40	2300-2400

Fonte: 3GPP, 2009.

## 3.2.4 A Interface de Rádio do LTE

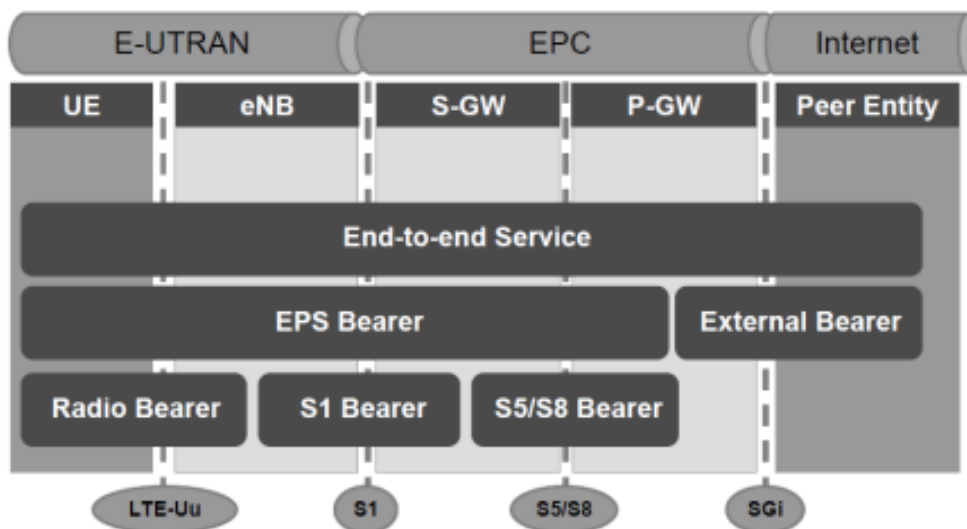
### 3.2.4.1 Arquitetura da Interface de Rádio do LTE

Assim como as tecnologias antecessoras, o LTE é estruturado em diferentes camadas de protocolos. Acompanhando a evolução que deu origem ao EPS, novas funções e novos protocolos surgiram também com o LTE, conforme ilustrado na Figura 9. Vale ressaltar que a arquitetura desses protocolos está toda estruturada no único nó da rede de acesso do LTE, a eNode-B (DAHLMAN,2007).



**Figura 9** - Estrutura dos Protocolos do LTE. Fonte: DAHLMAN, 2007.

Ao enviar dados no *downlink*, são estabelecidos os SAE Bearers, nos quais as informações trafegam no formato de pacotes IP. Os *Bearers* são caminhos lógicos que contemplam toda a rede, desde o UE sobre e-UTRAN e a EPS, até a conexão com uma rede PDN externa. Os SAE *Bearers* estão associados à qualidade de serviço atribuída aos usuários (QoS), geralmente expressa pelo QCI (QoS *Class Identifier*). A Figura 10 apresenta uma ilustração da formação dos SAE *Bearers* para um serviço genérico (TOSKALA, 2009).



**Figura 10** - Modelo de um SAE *Bearer*. Fonte: TOSKALA, 2009.

Antes que ocorra a transmissão pela interface de rádio, os pacotes IP vindos por esses *Bearers* são processados por vários protocolos, dentre os quais estão:

⇒ **PDCP** (*Packet Data Convergence Protocol*) - Responsável pela compressão de cabeçalho a fim de reduzir a carga binária necessária para a transmissão sobre a interface de rádio. Também garante a proteção da integridade dos dados transmitidos, a segurança e criptografia dos mesmos. No lado da recepção, ele decifra e descompacta as informações correspondentes àquelas modificadas na transmissão (DAHLMAN, 2007).

⇒ **RLC** (*Radio Link Control*) - Responsável pelo gerenciamento da retransmissão (ARQ) e pela entrega sequencial dos pacotes provindos das camadas superiores. Ainda realiza a segmentação e concatenação dos pacotes vindos do PDCP. Como o único nó da camada de acesso do LTE é a eNode-B, o RLC também se encontra neste nó, diferente do WCDMA/HSPA (DAHLMAN, 2007).

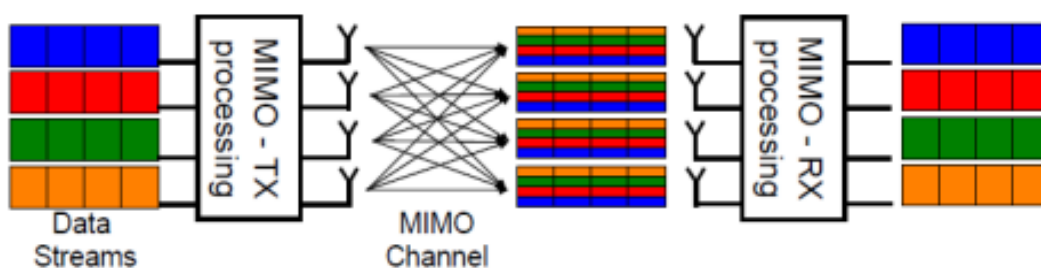
⇒ **MAC** (*Médium Access Control*) - Responsável pelo controle das retransmissões H-ARQ e pelo scheduling tanto para downlink como para uplink. A eNode-B concentra também a funcionalidade de scheduling, uma vez que a entidade MAC encontra-se localizada nela, sendo uma entidade por célula. A camada MAC ainda provê canais lógicos ao RLC e realiza a atribuição de

recursos para os usuários (melhor esquema de modulação e técnicas para múltiplas antenas) (DAHLMAN, 2007).

⇒ **PHY** (*Physical Layer*) - Responsável por gerenciar a codificação/decodificação, modulação/demodulação, mapeamento de múltiplas antenas e do sinal para os respectivos recursos físicos de tempo/frequência, dentre outras funções. A camada física oferece também canais de transporte para a camada MAC (DAHLMAN, 2007).

### 3.2.5 MIMO (Multiple Input – Multiple Output)

O MIMO - Múltiplas entradas e múltiplas saídas, é um conjunto de antenas na transmissão e na recepção . Essa tecnologia surgiu com intuito de alcançar maiores taxas de dados em rede celulares, na Figura 11 observa-se o comportamento do MIMO, o qual explora a conduta da propagação de múltiplos caminhos dos sinais.



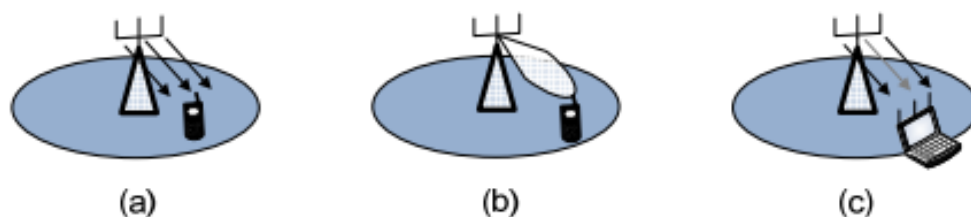
**Figura 11** – Configuração do MIMO. Fonte: Santos, 2010.

O 3GPP também regularizou o MIMO, como fez com todas tecnologias do LTE. Podendo assim padronizar, e conseqüentemente, ter como objetivo principal altas taxas de *Uplink* e *Downlink* .

A padronização do MIMO deu-se a partir de duas técnicas regularizadas pelo 3GPP, a primeira é Codificação espaço-tempo, nesse sistema é feito uma cópia do sinal, porém eles são codificados de formar diferentes e enviado simultâneamente por antenas diferentes. Assim, combatendo a perca do sinal no multipercurso.

A outra padronização do LTE é a Multiplexação espacial, nesse sistema o MIMO é utilizado formas diferentes, uma é quando ele utiliza um único usuário para transmitir dados para o receptor chamado de SU-MIMO (*Single User MIMO*), outro sistema utiliza a transmissão de vários usuários para o receptor simultaneamente, chamado de MU-MIMO (*Multi-User MIMO*).

Por fim, conhece-se o *beamforming* que é a técnica empregada no *downlink* que consiste basicamente em direcionar o feixe de transmissão em um dado usuário e, assim, conter a interferência causada sobre outros usuários, assim tendo melhoria na relação *signal-ruído* e, conseqüentemente, aumenta a capacidade, a área de cobertura e a confiabilidade deste. Na Figura 12 observa as três técnicas de transmissão MIMO.



**Figura 12** - As três técnicas de transmissão MIMO: (a) Ganho de diversidade; (b) *Beamforming*; (c) Multiplexação espacial. Fonte: SESIA, 2009.

### 3.2.6 Múltiplo Acesso no LTE

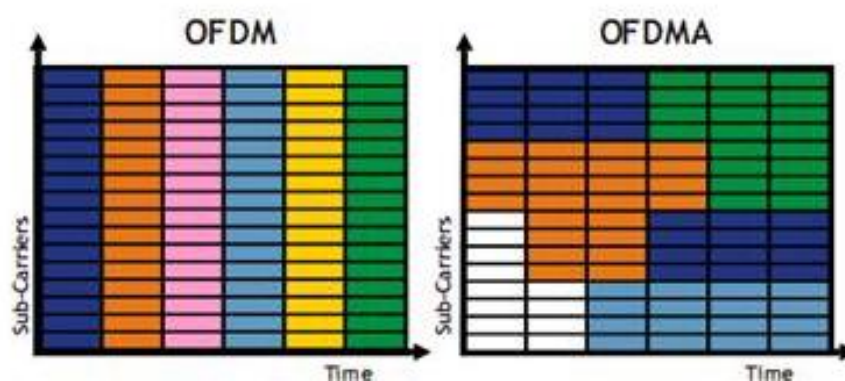
O múltiplo acesso no LTE é baseado em duas técnicas, conhecidas como OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para o *downlink* e no SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para o *uplink*.

#### 3.2.6.1 Princípios de OFDMA

O OFDMA é advinda de uma técnica especial de transmissão por múltiplas portadoras, o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), é uma técnica de dados que utiliza sua banda dividida em portadoras ortogonais,

assim obtendo uma boa eficiência espectral. Utiliza subportadoras, assim, divide as bandas do sinal em portadoras paralelas.

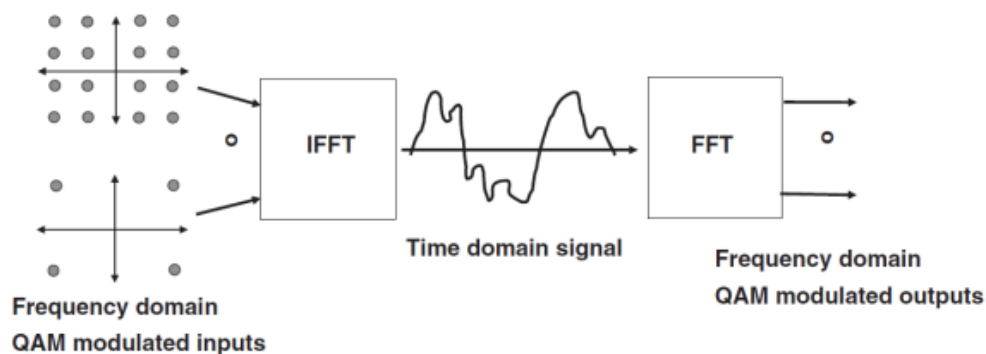
O OFDM no LTE separa a banda de frequência da portador, como viu-se anteriormente em subportadoras espaçadas de 15kHz, e modula cada um usando QPSK, 16QAM OU 64 QAM. A figura 13 mostra-se a diferença entre as duas técnicas.



**Figura 13** – Diferença entre OFDM e OFDMA. Fonte: Anritsu, 2010.

O OFDMA segue as mesmas premissas do OFDM, porém combinada com o TDMA, na qual os recursos são divididos em tempo e frequência, em que grupos de portadoras são alocados para vários usuários em um determinado tempo, como observa-se na figura acima. Já no OFDM a informação é modulada, convertida por um bloco série/paralelo, transformada para o domínio do tempo por um bloco IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) e transmitida, na recepção o efeito é ao contrário.

O bloco FFT (*Fast Fourier Transform*) é usado para transpor o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. A saída da FFT é, portanto, um único sinal obtido a partir da soma de várias senóides, e este possui uma variação de amplitude que depende da quantidade de subportadoras utilizadas como entrada do bloco FFT. O bloco IFFT faz o processo reverso, de transformar o sinal do domínio da frequência para o domínio do tempo. Respectivamente o receptor do bloco FFT converte o sinal recebido novamente em vários símbolos QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), como se observa na Figura 14.

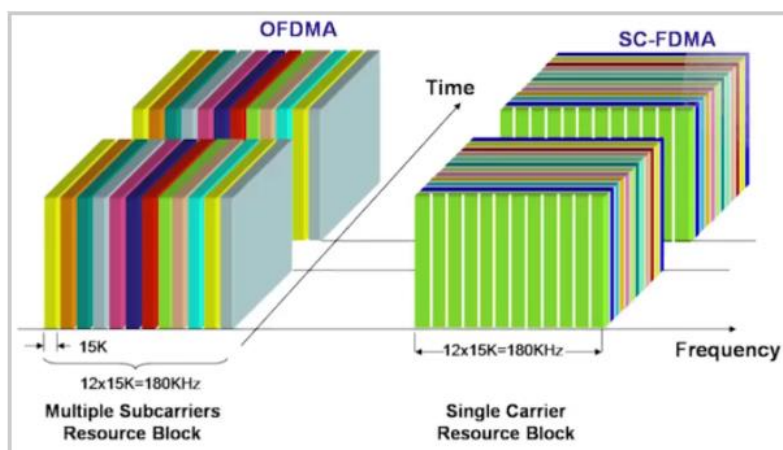


**Figura 14** - Princípio de funcionamento do bloco IFFT/FFT. **Fonte:** Holma, 2007.

Observa-se que os usuários codificados e modulados, passam pelo conversor e logo são mapeados nas subportadoras, compartilhando o canal de tempo e na frequência. Esse mapeamento é feito, em seguida os dados passam pelo bloco IFFT, e antes da transmissão é somado ao sinal o prefixo cíclico que garante o período de guarda necessária para que não haja interferência intersimbólica (GHOSH, 2011).

### 3.2.6.2 Princípios do SC - FDMA

O SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) é o esquema de múltiplo acesso utilizado no *uplink*. Apresenta uma multiplexação de portadora única de ter uma relação de potência de pico para média mais baixa. Nessa condição, os símbolos são pré-condicionados por uma DFT (*Discrete Fourier Transform*) antes de ser aplicado no IFFT. Assim, cada subportadora após o IFFT conterá parte de cada símbolo (REIS, 2014). Como observa-se na Figura 15, que mostra a diferença entre OFDMA e SC-FDMA, pode-se verificar também que a interferência intersimbólica será reduzida, uma vez que todas as subportadoras em um período de tempo representam o mesmo símbolo.



**Figura 15** – Arquitetura LTE simplificada mostrando o OFDMA x SC-FDMA. Fonte: REIS, 2011.

### 3.2.7 Camada Física do LTE

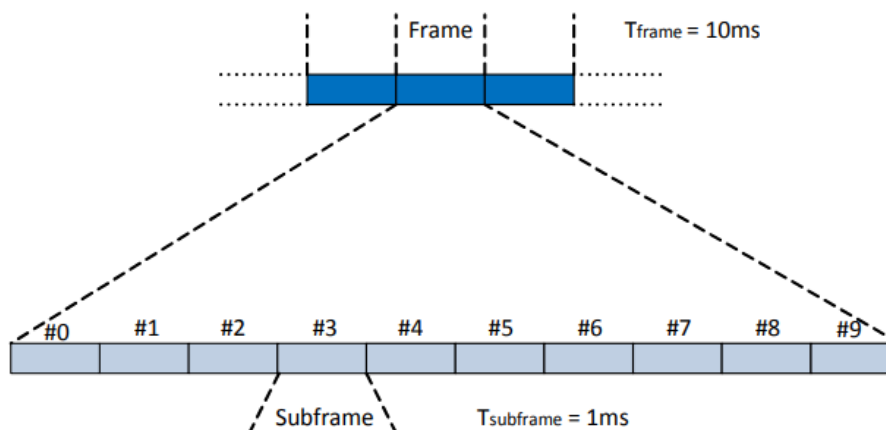
A camada Física é responsável por providenciar os serviços necessários para a camada MAC, como, mapeamento de antenas, modulação/demodulação, codificação/decodificação, sendo também responsável por estruturar os canais de transporte. Esses canais são responsáveis pela comunicação entre as camadas, então provendo para os usuários uma boa utilização no uso dos recursos, podendo atingir taxas de transmissão desejadas no LTE.

A partir dessa estrutura é possível entender mecanismos utilizados no LTE para que se ofereçam diversos níveis de QoS, altas taxas de dados e a confiabilidade do sistema. Essas estruturas de transmissão de *downlink* e *uplink* são de muito importância, assim como os modos de *duplexação* FDD e TDD.

#### 3.2.7.1 Estrutura de Transmissão no Domínio do Tempo

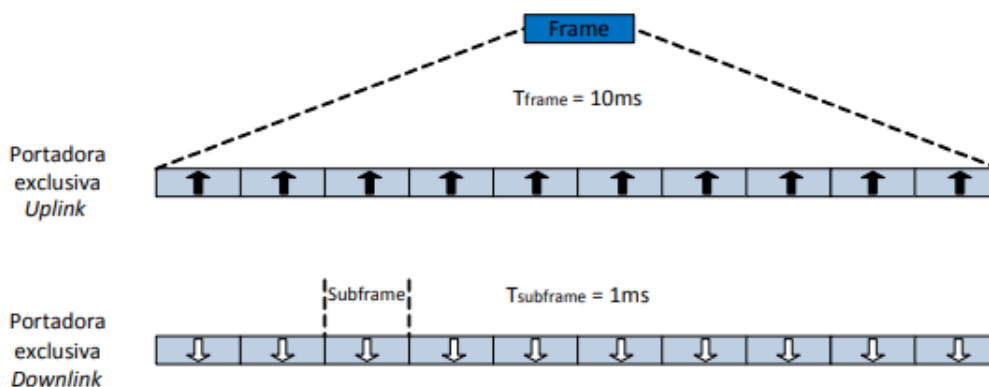
A transmissão no domínio do tempo é realizada através de blocos *frames*, que possuem duração de 10ms ( $T_{frame} = 10ms$ ). Estes são compostos por dez *subframes*, com duração de 1ms ( $T_{subframe} = 10ms$ ) cada. Na figura 16 observamos a estrutura de um *frame*, bem como os *subframes* que compõem.





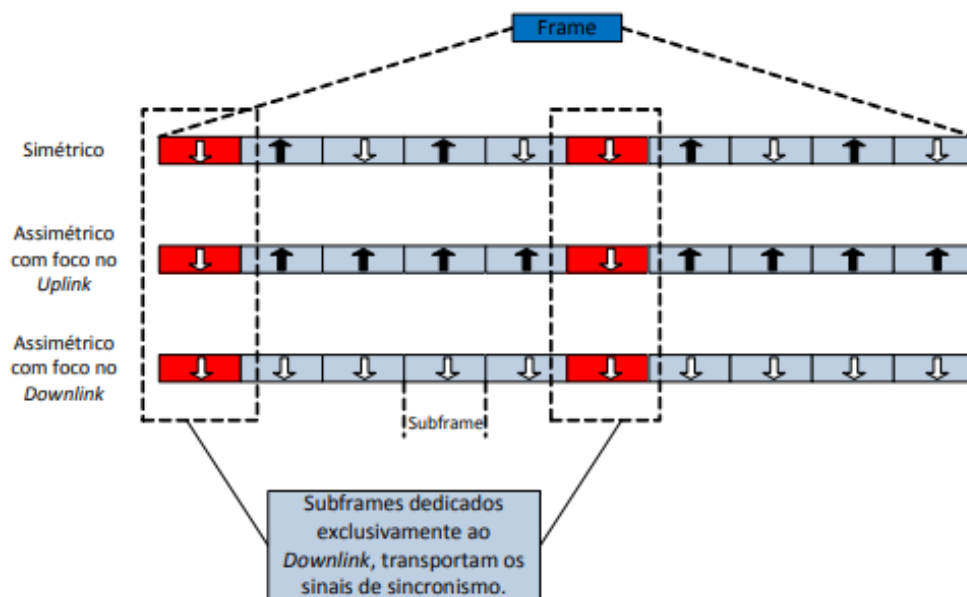
**Figura 16** - Estrutura de um frame no domínio do Tempo. Fonte: DAHLMAN, 2007.

Quando o modo de duplexação utilizado for o FDD, todos os *subframes* de um *frame* são utilizados na transmissão do *downlink* ou *uplink*, exclusivamente. Assim, tem-se uma portadora exclusiva para transmissão de *downlink* e outra para o *uplink*, conforme ilustrado na Figura 17.



**Figura 17** - Atribuição de Subframes na estrutura no FDD. Fonte: DAHLMAN, 2007.

Já no TDD, uma única portadora pode transmitir informações tanto de *downlink* como de *uplink* em um mesmo frame, no qual se têm *subframes* de *downlink* e de *uplink* compartilhando a portadora no tempo, conforme mostrado na Figura 18. Entretanto, neste modo de transmissão, o primeiro e o sexto *subframe* são alocados exclusivamente para o *downlink* e trazem os sinais de sincronismo do LTE (DAHLMAN, 2007).



**Figura 18** - Atribuição de subframes na estrutura no TDD. Fonte: DAHLMAN, 2007.

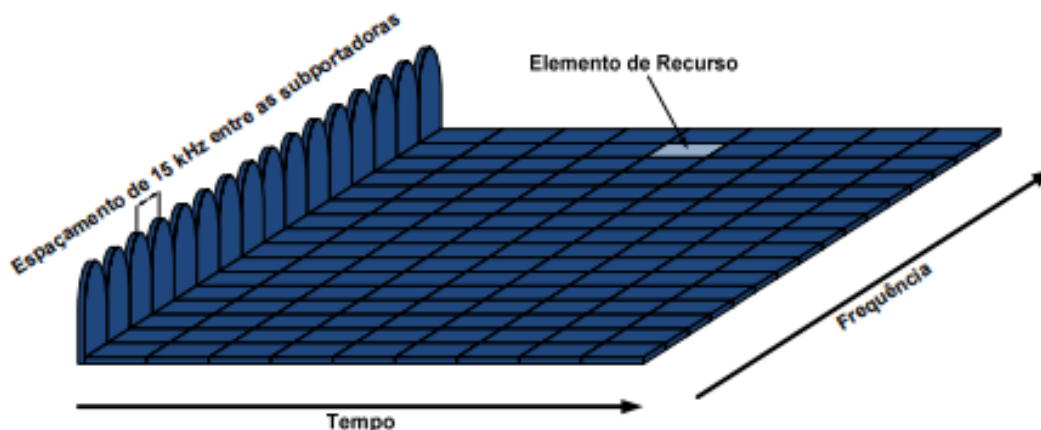
### 3.2.8 Transmissão no Downlink e os Sinais de Sincronismo

As informações de dados do usuário são transportadas através do canal PDHSCH (*Physical Downlink Shared Channel*), e as informações de controle é feito através do canal PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) no *downlink* do LTE. Assim, as informações são multiplexadas pela técnica OFDM.

No *downlink* são utilizadas modulações de ordem mais alta, tais como, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16-QAM e 64-QAM, de maneira a fornecer uma taxa de bits de 100Mbps/s (TOSKALA, 2009).

#### 3.2.8.1 Estrutura de Transmissão de Downlink

As subportadoras no *downlink* estão alocadas de maneira que, cada bloco de recurso é composto por 12 subportadoras, transmitidas em paralelo, com espaçamento de 15KHz entre elas. Como observa-se na Figura 19, a qual ilustra os elementos de recurso numa grade Tempo x Frequência, que associados formam um bloco de recurso.

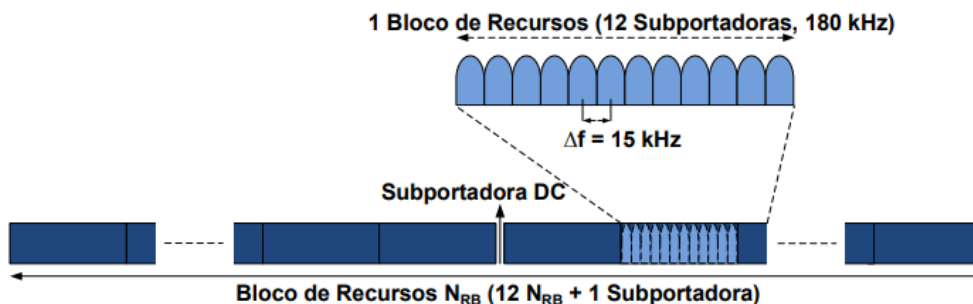


**Figura 19** - Elementos de recurso de downlink exibidos na grade Tempo x Frequência. Fonte: DAHLMAN, 2007.

Pode-se observar que a taxa de transmissão está diretamente associada com o número de blocos alocados para o usuário, esse número varia de acordo com a necessidade e o plano contratado (TOSKALA, 2009).

O bloco de recurso consequentemente, resulta em uma ocupação de 1 *slot* (180 KHz), como mostra-se na Figura 20 a seguir.

**Figura 20** - Bloco de recurso de downlink no domínio da frequência.



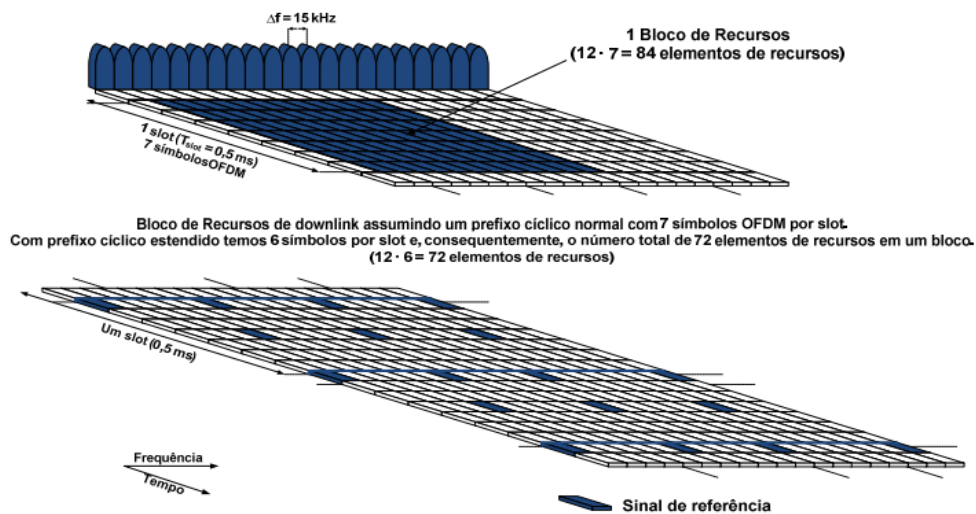
**Figura 20** - Bloco de recurso de downlink no domínio da frequência. Fonte: DAHLMAN, 2007.

Cada *subframe* é dividido em 2 *slots*, cada *slot* com duração de 0,5 ms, ou seja, o *subframe* corresponde a um TTI (*Transmit Time Interval*) com duração de 1 ms. No primeiro *slot*, além dos símbolos OFDM e seus respectivos prefixos cíclicos, existe a inserção de informações de controle. Já no segundo *slot* não há o envio de informações de controle.

### 3.2.8.2 Sinais de Referência e Sincronismo de Downlink

No downlink os sinais de referência têm como principal objetivo fornecer estimativas do canal, assim auxiliando na correção dos erros causados pelo desvanecimento inerente a transmissão. Como observa-se na Figura 20, os símbolos na grade Tempo x Frequência.

Tendo como referência um bloco de recurso com prefixo cíclico normal, ou seja, com 7 símbolos OFDM por subportadora, tem-se 84 símbolos (elementos de recurso), dos quais 80 são símbolos úteis, uma vez que 4 símbolos são utilizados pelos sinais de referência. Com 80 símbolos úteis, tem-se uma taxa mínima de 160 *bits* úteis/bloco de recurso, quando utilizada a modulação QPSK (2 *bits*/símbolo). Chega-se então a uma taxa efetiva de 320 Kbps úteis por bloco de recursos alocado, uma vez que cada bloco de recurso tem duração de 0,5ms. Considerando a modulação máxima possível, 64-QAM, tem-se uma taxa efetiva de 960 Kbps (TOSLKALA, 2009).

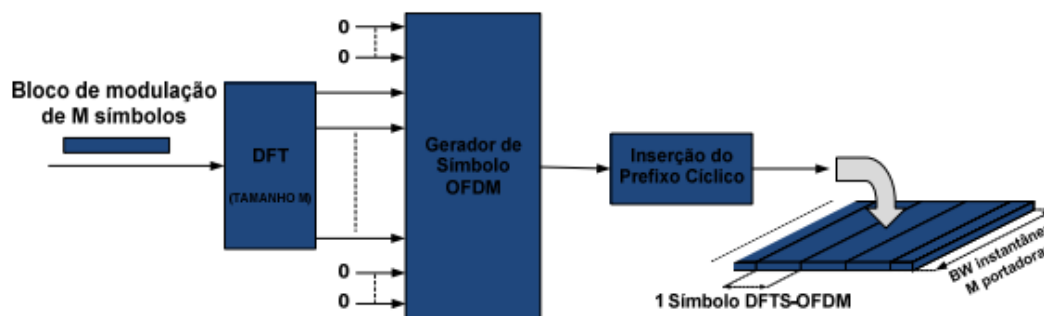


**Figura 21** - Sinais de sincronismo inseridos em um bloco de recurso. Fonte: DAHLMAN, 2007.

### 3.2.9 Transmissão no Uplink e os Sinais de Sincronismo

As informações de dados do usuário são transportadas pelo canal PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) e são multiplexadas pela técnica SC-FDMA no

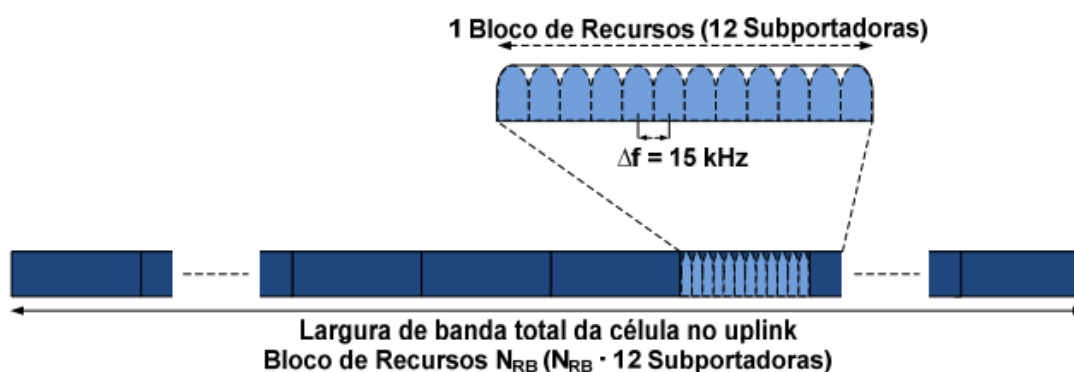
*uplink*. Nessa técnica simplifica-se a construção do terminal, assim diminuindo o custo do projeto, assim, reduzindo a exigência de linearidade do terminal, então resultando em uma baixa PAR, o que reduz o consumo de bateria.(TOSKALA, 2009).



**Figura 22** - Estrutura de transmissão SC-FDMA. Fonte: DAHLMAN, 2007.

### 3.2.9.1 Estrutura de Transmissão de Uplink

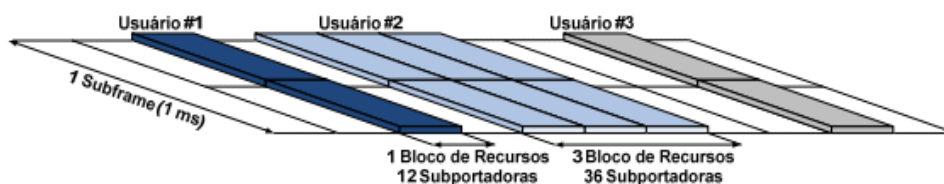
No *uplink* as subportadoras estão alocadas de modo que, cada bloco de recursos é composto por 12 subportadoras, com o espaçamento entre elas de 15 KHz, resultando numa ocupação nominal de banda da ordem de 180 KHz. De forma que cada *subframe* é composto por 2 *slots*, cada um com duração de 0,5ms. Sendo assim, os parâmetros de *uplink* estão casados com os parâmetros de *downlink*, conforme ilustrado na Figura 23.



**Figura 23** - Bloco de recurso de uplink no domínio da frequência. Fonte: DAHLMAN, 2007.

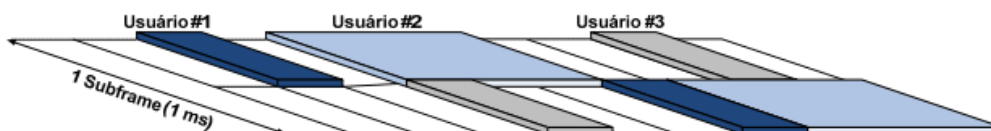
Por sua vez, cada *slot* é composto por 6 ou 7 blocos DFTS-OFDM, onde está presente, também, o prefixo cíclico que assim como no *downlink* pode ser

normal ou estendido. A Figura 24 ilustra uma alocação de recursos para diferentes usuários.



**Figura 24** - Alocação de recursos no uplink. Fonte: DAHLMAN, 2007.

Entretanto, a fim de se evitar a interferência, dois *slots* de um mesmo *subframe* podem não ocupar o mesmo conjunto de subportadoras. Para que se possa evitar tal ocorrência, são utilizados saltos de frequência (*Inter-slot Frequency Hopping*), ilustrados na Figura 25.



**Figura 25** - Alocação de recursos de uplink utilizando saltos de frequência . Fonte: DAHLMAN, 2007.

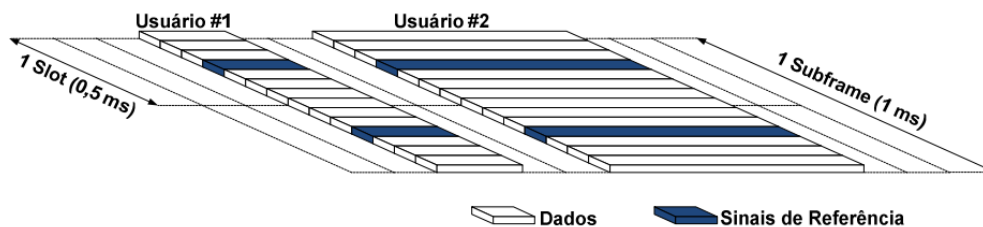
A alocação de banda se dá de forma contínua, em passos de 180 KHz e em uma largura de faixa que varia de 0 a 20 MHz. Isso acontece porque o sinal de *uplink* é modulado em FDMA, com a transmissão de um único símbolo por vez. Assim sendo, os saltos de frequência ocorrem exclusivamente em banda base (TOSKALA, 2009).

Os saltos de frequência são realizados a partir de uma mudança no processamento DFTS dos símbolos OFDM, alterando o mapeamento da DFT para IFFT.

### 3.2.9.2 Sinais de Sincronismo de Uplink

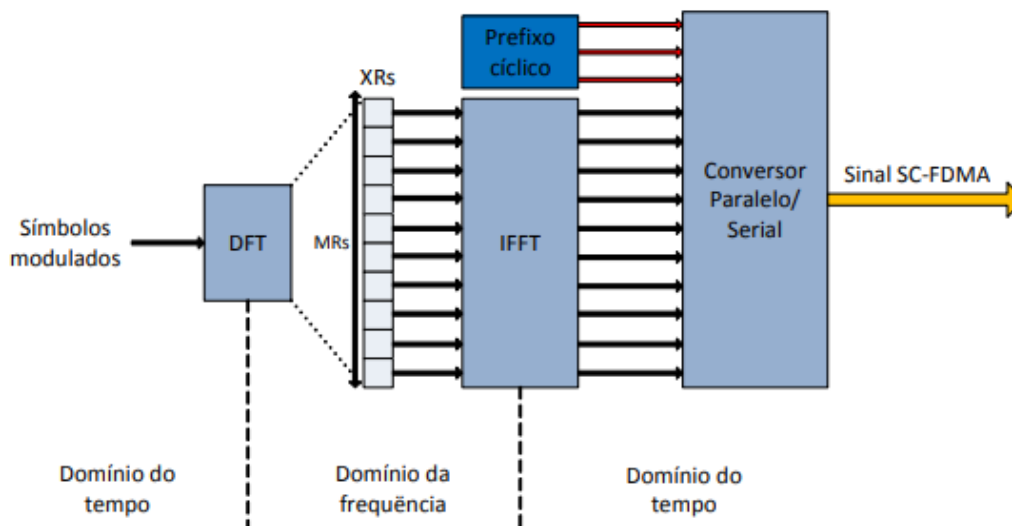
São multiplexados no tempo esses sinais e estão presentes no Tempo x Frequência de símbolos OFDM, assim, promovendo mecanismos para minimizar os efeitos de desvanecios do canal.

Os sinais de referência têm características diferenciadas, pois a potência de transmissão tem seu valor reduzido em relação ao *downlink*. Tais sinais são transmitidos no quarto bloco de cada *slot*, de forma de prefixo cíclico normal (7 símbolos OFDM por *slot*), sem a utilização de saltos de frequência, como ilustrado na figura 26.



**Figura 26** - Sinais de sincronismo de uplink. Fonte: DAHLMAN, 2007.

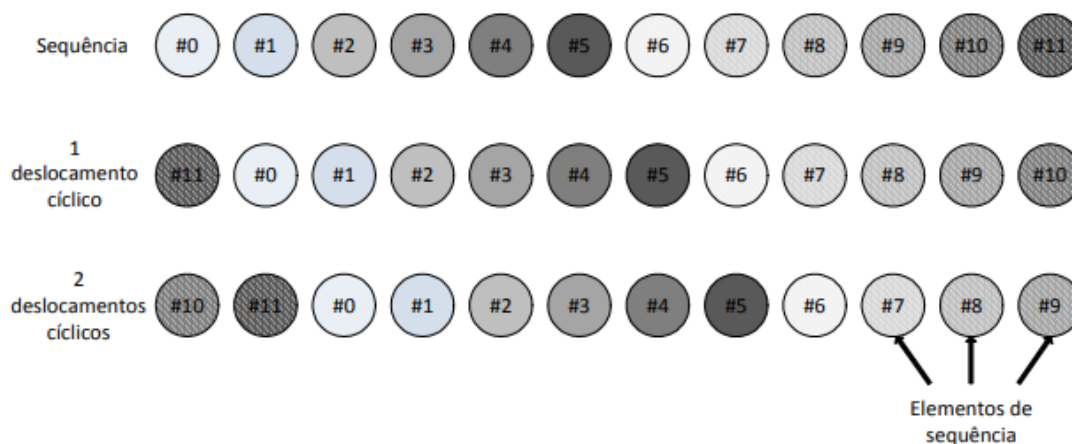
Quando os saltos de frequências são utilizados, esses sinais de frequências são inseridos em slot por meio do mapeamento dos símbolos modulados, e são pré-codificados pela DFT nos blocos de recursos alocados. Esse sinal gerado no domínio da frequência passa pelo bloco de IFFT, onde ocorre a inserção do prefixo cíclico no quarto bloco do *slot*, como se observa na figura 27.



**Figura 27** - Sinal SC-FDMA, com sinais de referência de uplink gerados a partir dos símbolos modulados. Fonte: DAHLMAN, 2007.

A necessidade de vários comprimentos de seqüências na geração de sinais de referência, para assim, se oferecer suporte às opções de largura de banda do sistema. A fim de facilitar o planejamento de célula, seqüências que tem seu comprimento sendo um número primo são utilizadas para gerar sinais de referência de maior comprimento. Isso reduz possíveis interferências entre os sinais de referência (TOSKALA, 2009).

A propriedade da CAZAC (*Constant Amplitude Zero Auto Correlation*), é utilizada para gerar os sinais de referência, nesses sinais são gerados deslocamentos circulares da seqüência sendo estes ortogonais entre si, como mostrado na figura 28.





**Figura 28** - Deslocamentos circulares de uma sequência. Fonte: Toskala, 2009.

Isso possibilita visualizar um método bastante conveniente de se gerar múltiplas sequências ortogonais a partir de uma única sequência de referência, que é usado no LTE para multiplexar-se os dados dos usuários. Entretanto, a fim de se manter a ortogonalidade, a diferença de tempo entre sinais vindos da ERB não deverá exceder o período de separação do deslocamento cíclico (GHOSH, 2011).

## 4 Cenário de Teste e Resultados

Os benefícios do LTE podem ser empregados, em prol da cultura nacional do futebol, em estádios durante as partidas para:

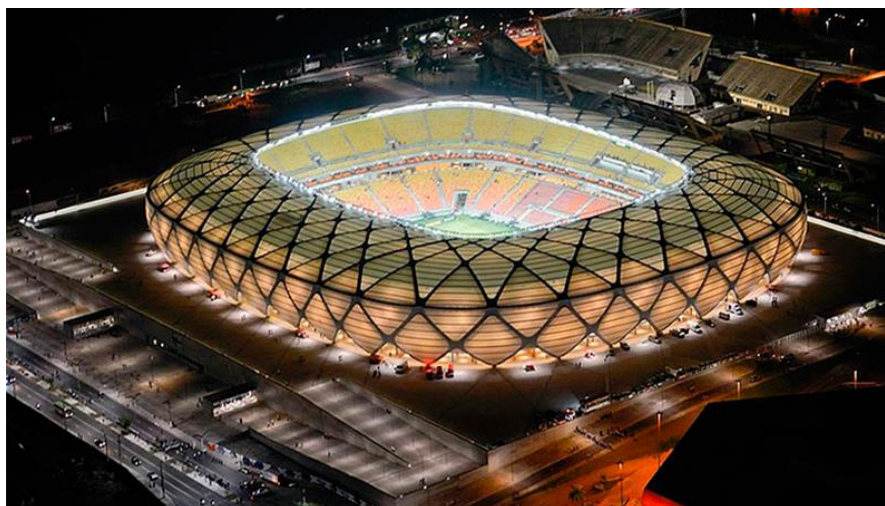
- Proporcionar acesso a dados do jogo em alta velocidade;
- Permitir o upload de fotos/vídeos para redes sociais;
- Acompanhar a narração ao vivo de dados com baixa latência.

### 4.1 Cenário de Teste: Projeto de Cobertura e Capacidade da Arena da Amazônia Utilizando Redes LTE

A Arena da Amazônia é um estádio de futebol construído para sediar a Copa do Mundo de futebol que aconteceu no Brasil em 2014. A capacidade máxima do estádio é de aproximadamente 44 mil pessoas, com o gramado medindo (105x68m).

Atualmente, também utilizada para shows e eventos, a Arena da Amazônia ainda padece com uma rede móvel precária, com o usuário não conseguindo se conectar de maneira eficiente, quando compartilha a rede com muitos outros, foi exatamente pensando nisso, que veio a proposta do projeto. Um projeto de cobertura e de capacidade para melhorar a conexão dentro dessa

que é um dos símbolos da nossa cidade, e que tem tanto para ser divulgada e apreciada. Além da problemática maior que é quanto a velocidade de conexão lenta devido a lotação e sinal de qualidade ruim devido ao posicionamento errôneo dos sites.



**Figura 29** – Arena da Amazônia. Fonte: ManausAtual, 2021.

## 4.1.1 Etapas de Dimensionamento da Cobertura

A etapas de cobertura se iniciam com o cálculo do Link Budget, que é o cálculo de potência em todo o percurso entre RX e TX, assim então, levando em consideração a potência de transmissão, as diversas perdas em equipamentos, ganho da antena, de amplificadores, e efeito de Propagação (TELECO, 2018).

### 4.1.1.1 Link Budget

O link Budget é responsável por calcular a atenuação de *downlink* e *uplink* do enlace. A seguir tem-se a fórmula:

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Requerida} - R_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (4.1)$$

Onde,

*L* - Máxima Perda de *Downlink/Uplink*;

$P_{tx}$  – Potência de Transmissão (dBm);

$G_{tx}$  – Ganho da Antena Transmissora (dBi);

$L_{tx}$  – Perdas na Transmissão (dB);

$SNR_{Requerida}$  – Relação Sinal Ruído Requerida (dB);

$R_{rx}$  – Sensibilidade Requerida na Recepção (dB);

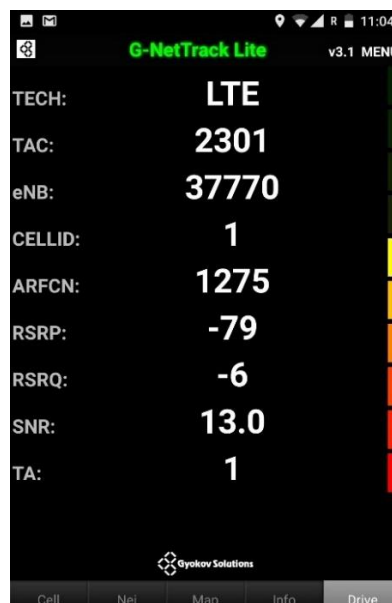
$G_{rx}$  – Ganho da Antena Receptora (dBi);

$L_{rx}$  – Perdas na Recepção (dB);

$G_{dv}$  – Ganho de Diversidade (dBi);

$M$  – Margem de desvanecimento (dB).

O parâmetro de sensibilidade da recepção foi escolhido empiricamente como -79 dBm com o auxílio do Aplicativo GNet – Track Pro, um aplicativo utilizado para coletar medições dos principais parâmetros de rede, como potência recebida, relação sinal ruído e qualidade do sinal. como se observa na Figura 30.



**Figura 30** – Parâmetro de sensibilidade da Recepção no App Gnet – Track Pro. **Fonte:**

Autor via Gnet Track Pro, 2009.

As Tabelas a seguir apresentam parâmetros utilizados no Link Budget (ADITYAWARMAN, 2015), tanto para *downlink* quanto pra *uplink*. O Link Budget para *Downlink* tem como valor 87 dB, como observa-se na equação (4.2). Assim, como o para Uplink é igual a 89 dB, como observa-se na equação (4.3). Portanto, as tabelas 6 e 7 Mostram seus parâmetros.

$$LB_{DL} = 12 - (-79) - 4 = 87 \quad (4.2)$$

$$LB_{UL} = 13 - (-79) + 3 - 3 + 1 - 4 = 89 \quad (4.3)$$

**Tabela 6** – Link Budget Downlink - Indoor

Link Budget Downlink - Indoor			Valor típico
Downlink			
Transmissor	Potência Tx	12	10 a 43 dBm
	Ganho da antena TX	3	2 a 20 dBi
	Perda no cabo de TX	3	0 a 6 dB
EIRP		12	Calculado (dBm)
Receptor	Relação sinal/ruído requerida	0	3GPP TS 36.213
		-	
	Sensibilidade de referência	79	App Gnet track pro
	Ganho antena RX	0	5 a 10 dBi
	Perda penetração predial	0	0 a 3,5 dB para voz
Margem	Margem de desvanecimento	4	3 a 8 dB
	Margem total	4	dB
LB_DL		87	dB

Fonte: Autor.

**Tabela 7** – Link Budget uplink - Indoor

Link Budget Uplink - Indoor			Valor típico
Downlink			
Transmissor	Potência Tx	13	10 a 43 dBm
	Ganho da antena TX	0	-5 a 10 dBi
	Perda no cabo de TX	0	0 a 6 dB
EIRP		13	Calculado (dBm)
Receptor	Relação sinal/ruído requerida	0	3GPP TS 36.213
	Sensibilidade de referência	-79	App Gnet track pro
	Ganho antena RX	3	5 a 10 dBi
	Perda do corpo	3	0 a 6 dB Caso o projeto seja Indoor
	Ganho de diversidade	1	-5 a 10 dB
Margem	Margem de desvanecimento	4	3 a 8 dB
	Margem total	4	dB
LB_UL		89	dB

Fonte: Autor.

#### 4.1.1.2 Cálculo do raio do *Site*

Para o cálculo do raio do *site*, usa-se o valor encontrado no cálculo do *Link Budget* aplicado na parcela de atenuação da equação do modelo de previsão da perda de percurso (*Path loss*). Usou-se neste trabalho o modelo de previsão SUI (*Universidade Stanford*) por ser adequado para sistemas que operam entre frequências de 2,5 – 3,5 GHz (3GPP). O modelo SUI pode ser usado para os tipos de terrenos abaixo, como se observa na Tabela 8.

**Tabela 8** – Terrenos Utilizados no Modelo SUI.

<b>Terreno A</b>	Terreno Irregular com Alta ou Moderada Densidade de vegetação.
<b>Terreno B</b>	Terreno Irregular com Baixa Densidade de vegetação ou Planície com Alta ou Moderada Densidade de vegetação.
<b>Terreno C</b>	Planície de Baixa Densidade de Árvores.

Fonte: Santos, 2010.

As perdas de propagação pelo modelo (dB) se observa no cálculo a seguir:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad (4.4)$$

Onde  $d$  é a distância do raio da célula e  $d_0$  é a distância de referência, adotada por convenção  $d_0 = 100m$ , assim,  $d > d_0$ .

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (4.5)$$

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (4.6)$$

Onde  $f$  é a frequência em MHz;

$X_h$  representa o fator de correção da altura da antena receptora;

$s$  corresponde ao desvanecimento de acordo com o tipo de terreno;

$A$  representa a perda no espaço livre.

$X_f$  representa o fator de correção da frequência;

$\gamma$  é o expoente de perda em função da altura da torre de transmissão;

$\lambda$  é o comprimento de onda.

Para Terreno do Tipo C (Plano e sem vegetações), onde  $h$  é altura da antena receptora, entre  $2m \leq h \leq 10m$ . tem-se:

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad (4.7)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (4.8)$$

Onde as constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  foram determinadas empiricamente e podem ser obtidas na Tabela a seguir. A altura da antena da estação rádio base ( $h_b$ ) deve ter valores entre 10 e 80 metros.

**Tabela 9** – Valores dos Parâmetro do Modelo SUI dos Tipos de Terreno.

Parâmetro	Terreno Tipo A	Terreno Tipo B	Terreno Tipo C
<b>A</b>	4.6	4.0	3.6
<b>b (1/m)</b>	0.0075	0.0065	0.0050
<b>c (m)</b>	12.6	17.1	20.0

Fonte: Santos, 2010.

#### 4.1.1.3 Parâmetros Utilizados no Projeto

De acordo com as características de transmissão na região da cidade de Manaus, optou-se por adotar os parâmetros de transmissão da banda 7 do LTE (banda que está a mais tempo em operação na cidade) aplicados a torres de

transmissão de 40m (altura aproximada da arena da amazônia) sujeitos as ações do devasnecimento,  $s$ , característico do terreno.

As etapas de cálculos do modelo de predição SUI serão descritas a seguir.

- Atenuação no Espaço Livre:

$$A = 20 \log \left( \frac{4\pi 100}{3 \times 10^8 / 2600 \times 10^6} \right) \quad (4.9)$$

$$A = 80,74 \text{ dB} \quad (4.10)$$

- Fator de Correção de Frequência:

$$X_f = 6 \log \left( \frac{2600 \times 10^6}{2000} \right) \quad (4.11)$$

$$X_f = 0,683 \text{ dB} \quad (4.12)$$

- Fator de Correção da Altura da Antena:

$$X_h = -20 \log \left( \frac{1,8}{2} \right) \quad (4.13)$$

$$X_h = 0,91 \text{ dB} \quad (4.14)$$

- Perda em função da altura da torre de transmissão: De acordo com o tipo de terreno do Tipo C, tem-se,

$$\gamma = 3,6 - 0,005 \times 40 + \left( \frac{20}{40} \right) \quad (4.15)$$

$$\gamma = 3,9 \text{ dB} \quad (4.16)$$

Substituindo-se o valores encontrados acima na Equação do modelo de predição SUI, tem-se:

$$L = 80,74 + 10\gamma \log \left( \frac{d}{100} \right) + 0,6836 + 0,91 + 4 \quad (4.17)$$

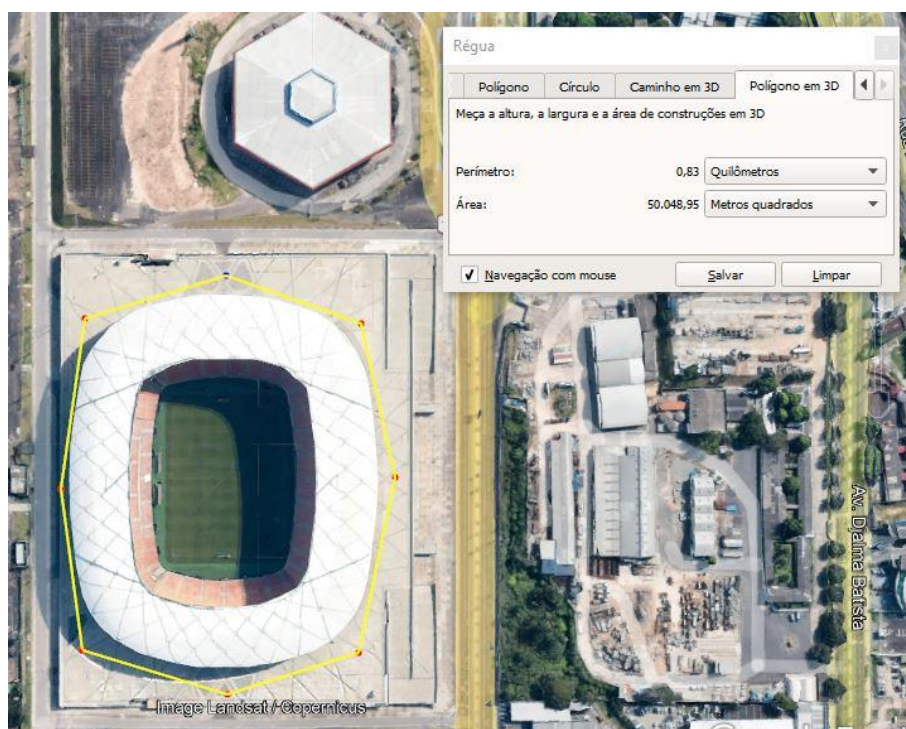
Aplicando o valor do cálculo do *Link Budget* na fórmula do modelo acima, pode-se isolar a variável da distância e encontrar o valor do raio da célula. Aplicou-se o menor valor entre os sentidos de *downlink* e *uplink* de forma a garantir a comunicação em ambos os sentidos. O maior valor encontrado foi 89 dB (uplink). Portanto, tem-se:

$$89 = 80,74 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836 + 0,91 + 4 \quad (4.18)$$

Logo, a distância do raio do site é  $d=117\text{m}$ .

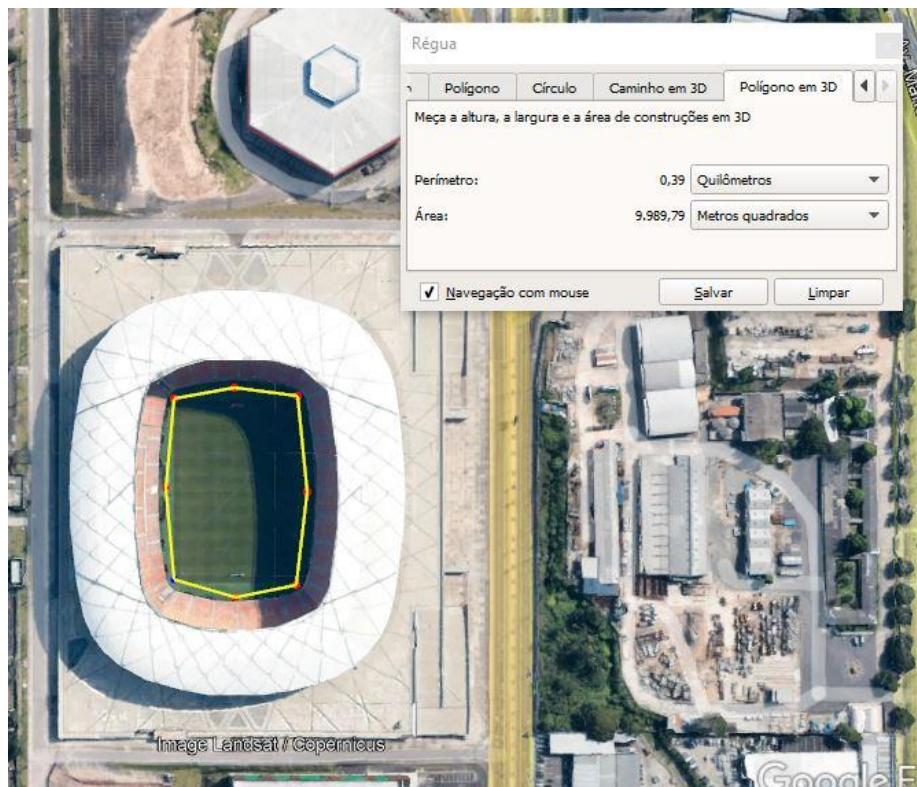
#### 4.1.1.4 Cálculo do Número de *Sites* Necessários para a Cobertura

De acordo com medições efetuadas no Software Google Earth observa-se, na Figura 31, que a área do estádio é de aproximadamente  $50.000 \text{ m}^2$ , e, na Figura 32, que a área do gramado é de aproximadamente  $10.000 \text{ m}^2$ , logo a área da arquibancada é de aproximadamente  $40.000 \text{ m}^2$ .



**Figura 31** – Área do estádio no Google Earth. **Fonte:** Autor, 2021.





**Figura 32** - Área interna (gramado) no Google Earth. **Fonte:** Autor, 2021.

De posse da área da arquibancada deve-se calcular o número de *sites* necessários para garantir a cobertura em sua totalidade. A área de cobertura do *site* é dada pela equação (4.19).

$$a = \frac{3 \times \sqrt{3} \times R^2}{2} \quad (4.19)$$

A fórmula anterior é usada para cálculos de áreas hexagonais, os sites serão instalados nas paredes internas do estádio e a área coberta terá aproximadamente o formato de 2/6 de um hexágono (1/3 da área de cobertura calculada pela fórmula anterior). Logo a fórmula da área de cobertura de um *site* é,

$$a = \frac{3 \times \sqrt{3} \times R^2}{2} \times \frac{1}{3} \quad (4.20)$$

$$a = \frac{3 \times \sqrt{3} \times \left(\frac{117}{1000}\right)^2}{2} \times \frac{1}{3} \quad (4.21)$$

$$a = 11.900m^2 \quad (4.22)$$

De posse do valor da área do *site* pode-se calcular o número de sites necessários para cobrir a Arena da Amazônia.

$$n^{\circ} \text{ de sites} = \frac{\text{área da arquibancada}}{\text{área do site}} \quad (4.23)$$

$$n^{\circ} \text{ de sites} = \frac{40.000}{11.900} \quad (4.27)$$

$$n^{\circ} \text{ de sites} = 3,37 \quad (4.28)$$

Portanto, precisa-se de 4 *sites* para a cobertura desse projeto.

#### 4.1.2 Etapas de Projeto de Capacidade

Para o cálculo da capacidade na banda 7 tem-se os seguintes parâmetros, usando a modulação de 64QAM. Como se observa na Tabela 9.

**Tabela 10** – Parâmetros para Capacidade da Rede

Período de Símbolo	$71,36e^{-6} \text{ s}$
Bits/Símbolo	6
Subportadoras	1200
Taxa de Codificação	5/6

Fonte: Santos, 2010.

Após encontrar os parâmetros, pode-se calcular o *throughput*, ou seja, quantidade de dados transferidos em uma rede, com o auxílio da fórmula abaixo:

$$th = \left( \frac{1}{\text{Período de símbolo}} \right) \times \frac{\text{bits}}{\text{símbolo}} \times \text{taxa de codificação} \times \text{subportadoras}$$

$$th = \left( \frac{1}{71,36e^{-6}} \right) \times 6 \times \frac{5}{6} \times 1200 \quad (4.29)$$

$$th = 84,02 \text{ Mbs} \quad (4.30)$$

De posse dos parâmetros de transmissão listados acima, e adotando a 90% de utilização dos recursos do *site* na *busy hour*, é calculada a hora de maior utilização dos recursos de rede. Ela pode ser compreendida com uma faixa de tempo na qual se observa qual o pico de tráfego de dados no período de um dia (FLOBAK, 2018), usa-se a fórmula a seguir para o cálculo de fluxo de dados:

$$X_{BH} = th \times 3600 \times \left( \frac{Q_{BH}}{100} \right) \quad (4.31)$$

$$X_{BH} = 84,02e^6 \times 3600 \times \left( \frac{40}{100} \right) \quad (4.32)$$

$$X_{BH} = 272,39 \text{ Gb} \quad (4.33)$$

Onde

$X_{BH}$  = tráfego na *busy hour* por célula (Gb);

$Q_{BH}$  = Carga média na *busy hour* (%).

Estimando que a *busy hour* compõe uma parcela,  $Y_{BH}$ , de 40% do tráfego diário do *site*, pode-se calcular o volume de dados diário:

$$X_D = \left( \frac{(X_{BH} \times 100)}{Y_{BH}} \right) \quad (4.34)$$

$$X_D = \left( \frac{(272,39 e^9 \times 100)}{40} \right) \quad (4.35)$$

$$X_D = 680,09 \text{ Gb} \quad (4.36)$$

Considerando o volume médio de dados consumidos,  $V_u$ , por um usuário de 80MB (1 byte = 8 bits), pode-se calcular o número de usuários por *site* da seguinte forma (SPILLER, 2014):

$$n_{usu} = \frac{X_D}{V_u} \quad (4.37)$$

$$n_{usu} = \frac{680,09 e^9}{80e^6 \times 8} \quad (4.38)$$

$$n_{usu} = 1064 \text{ usuários} \quad (4.39)$$

Adotando-se 2 setores por *site*, e sabendo que a rede interna é formada por 4 *sites*, pode-se calcular o número total de usuários atendidos simultaneamente:

$$n_{total\ usu} = n_{usu} \times 2 \times 4 \quad (4.40)$$

$$n_{total\ usu} = 8512 \text{ usuários} \quad (4.41)$$

Pode-se calcular a porcentagem de usuários da arena da amazônia que pode ser atendida simultaneamente. Para isso, tendo posse do número de assentos,  $n_{total\ assentos}$ , de 44300, faz-se:

$$P_{usu} = \frac{n_{total\ usu}}{n_{total\ assentos}} \quad (4.42)$$

$$P_{usu} = \frac{8512}{44300} \quad (4.43)$$

$$P_{usu} = 19,21\% \text{ da capacidade} \quad (4.44)$$

## 5 Simulações e Resultados

### 5.1 Resultados da Cobertura e Capacidade

De acordo com os cálculos realizados anteriormente, obteu-se os resultados mostrados para Dimensionamento de Cobertura e Capacidade da Rede, nas tabelas a seguir.

Result. do dimensionamento da área de cobertura	
Área da arquibancada	40000 m <sup>2</sup>
Área de cada site	10300 m <sup>2</sup>
Raio de cada site	109,2 m
Número de sites	4

**Tabela 11** – Dimensionamento da área de Cobertura. Fonte: Autor.

Resultados do dimensionamento da capacidade de cada site	
Período de símbolo	71.367e-6 s
Modulação	64-QAM
Largura de banda	20 MHz
Subportadoras	1200
Taxa de codificação	5/6
Throughput	84,07 Mb/s
% de utilização do site na Busy Hour	90%
Dados transmitidos por site na Busy Hour	272,39 Gb
% de fluxo da busy hour em relação ao fluxo diário	40%
Fluxo de dados do site por dia	680,09 Gb
Consumo médio de um usuário	800 Mb
Número de setores por site	2
Número de usuários por setor	1064
Número usuários atendidos simultaneamente	8512
Capacidade de torcedores	44300
Porcentagem de torcedores atendida simultaneamente	19,21%

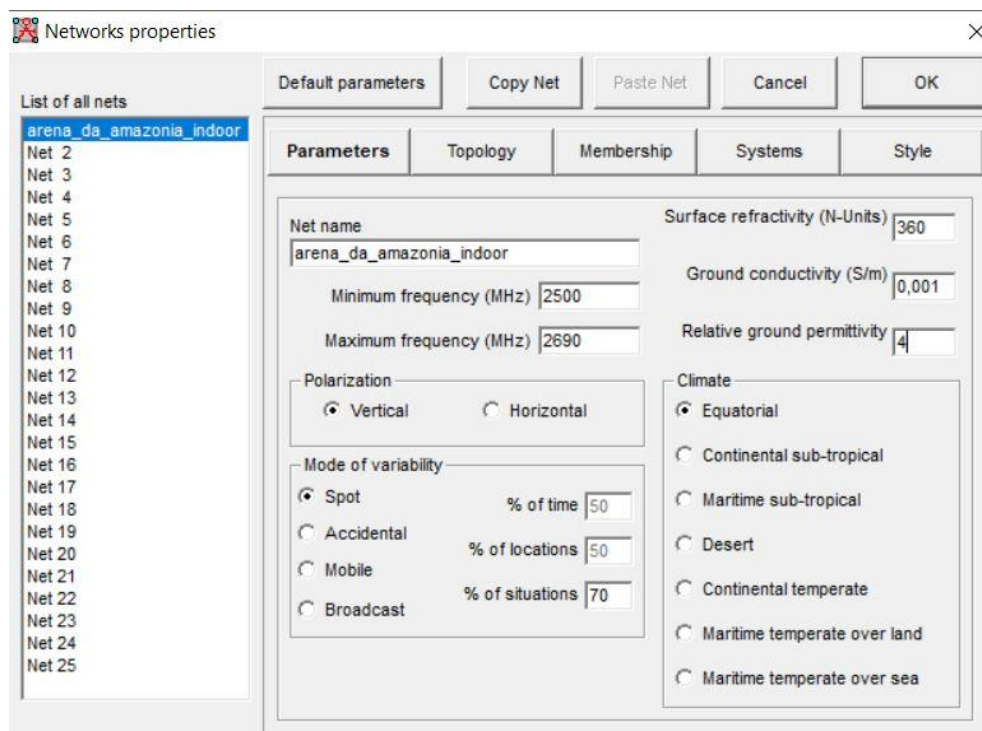
**Tabela 12** – Dimensionamento da capacidade de cada site. Fonte: Autor.

## 5.2 Simulações de Rede na Arena da Amazônia Realizadas no Software Radio Mobile

O Radio Mobile é um software utilizado para planejamento dos enlaces das redes de comunicações 2G, 3G, e 4G. Pode-se observar os enlaces, e parâmetros de rede, assim, como também visualizar o projeto no google earth.

O Software Radio Mobile foi escolhido para realizar as simulações de cobertura de rede do projeto por possuir recursos de configuração próximos da realidade. A seguir verifica-se a configuração do software de acordo com parâmetros encontrados anteriormente.

A figura 33 apresenta as configurações da rede em relação ao tipo de solo (HUFFORD,1982).

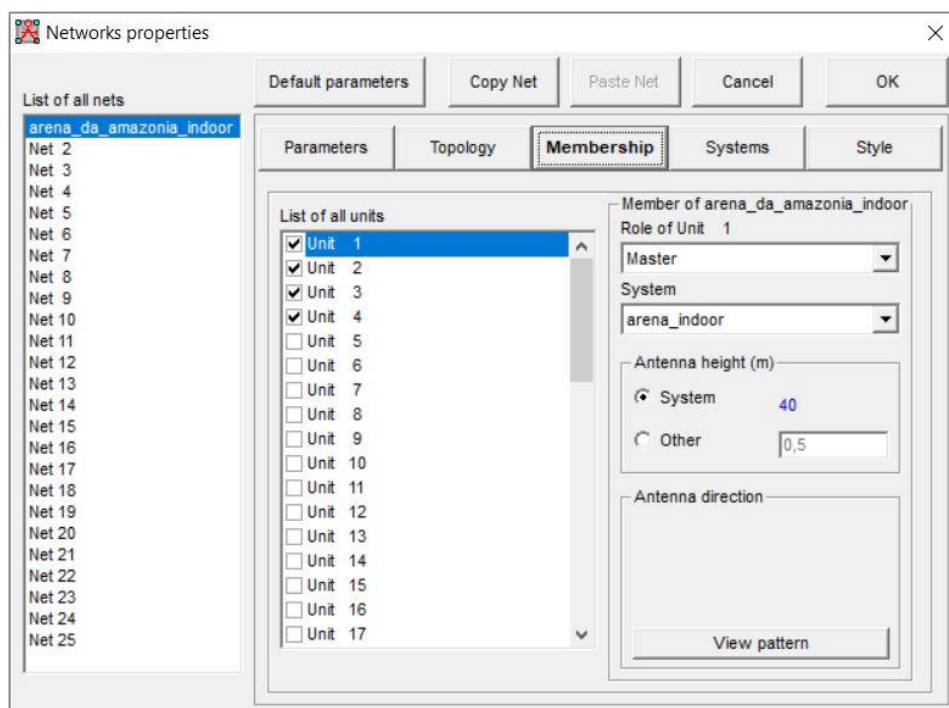


**Figura 33** – Parâmetros de solo no Radio Mobile. Fonte: Autor.

Os parâmetros de permissividade, condutividade e Refratividade foram definidos por Hufford, de acordo com estudos realizados em diferentes tipos de terreno. Assim sendo, pode-se dizer que o solo de Manaus é pobre (ITALO,

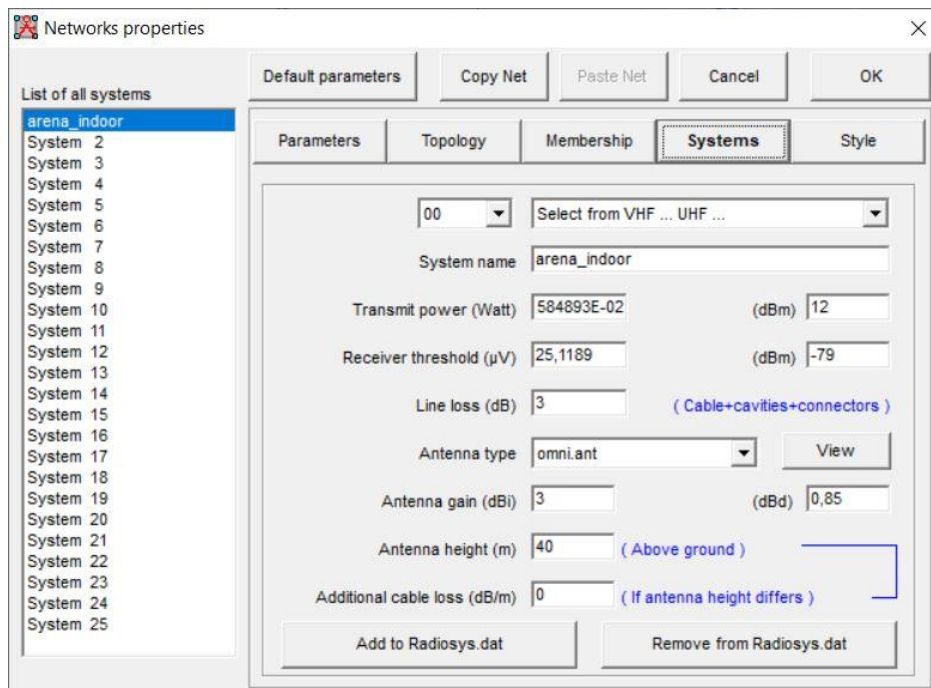
2006), pois não possui muitos nutrientes. Portanto, esses valores citados na figura são valores tabelados. Usamos também o parâmetro de tipo de clima como Equatorial.

A figura 34 apresenta a configuração da hierarquia dos sites no Software Radio Mobile, como pode-se observar a seguir, todos os sites possuem o mesmo nível hierárquico (Master) e todos possuem altura de 40m (aproximadamente a altura da Arena) .



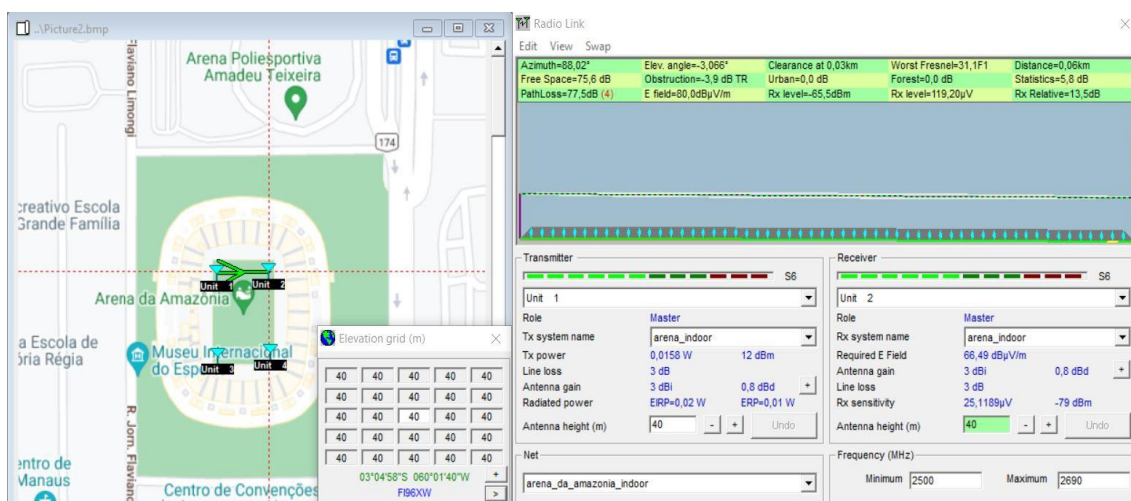
**Figura 34** -hierarquia dos sites no Radio Mobile. Fonte: Autor.

A Figura 35 mostra as configurações dos parâmetros de Transmissão para o projeto no radio mobile. Os parâmetros são os encontrados anteriormente. No caso, a potência de transmissão, sensibilidade do receptor, perdas nos cabos, ganho da antena transmissora e altura da antena. Como pode-se observar a seguir:



**Figura 35** – Parâmetros de Transmissão no Radio Mobile. **Fonte:** Autor.

Após a configuração de todos os parâmetros apresentados acima, é possível verificar a ativação da rede, observando o pleno funcionamento em todos os enlaces que fazem parte da mesma.



**Figura 36** – Verificação do Enlace com sentido da Célula 1 para Célula 2 no Radio Mobile.

**Fonte:** Autor.

De acordo com a Figura anterior, é possível verificar que o enlace encontra-se sem obstruções, com bons níveis de sinal (de acordo com o parâmetro de nível de recepção apresentado no topo da Figura) e ativo (parâmetro confirmado pela seta verde). Também pode-se verificar os níveis de



elevação do solo e o sentido da comunicação de um site para o outro, confirmando a ligação entre sites vizinhos para o caso do usuário precisar fazer um procedimento de *handover*. Outros parâmetros também podem ser analisados como zona de Fresnel, azimute, *path loss* e distância entre *sites*.

Seguido o mesmo raciocínio usado para o Enlace da Célula 1 para Célula 2, verifica-se a ativação dos enlaces restantes.

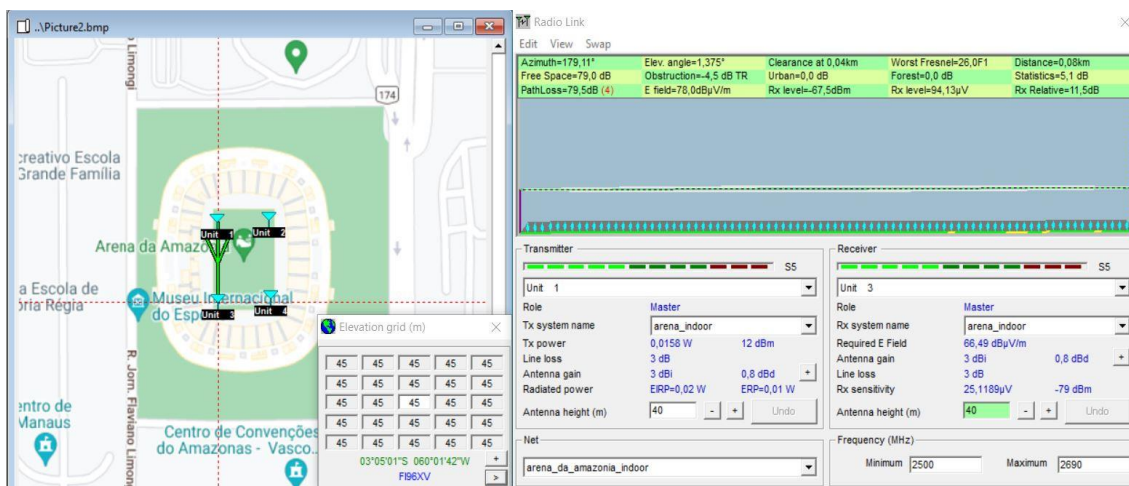


Figura 37 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 1 para Célula 3. Fonte: Autor.

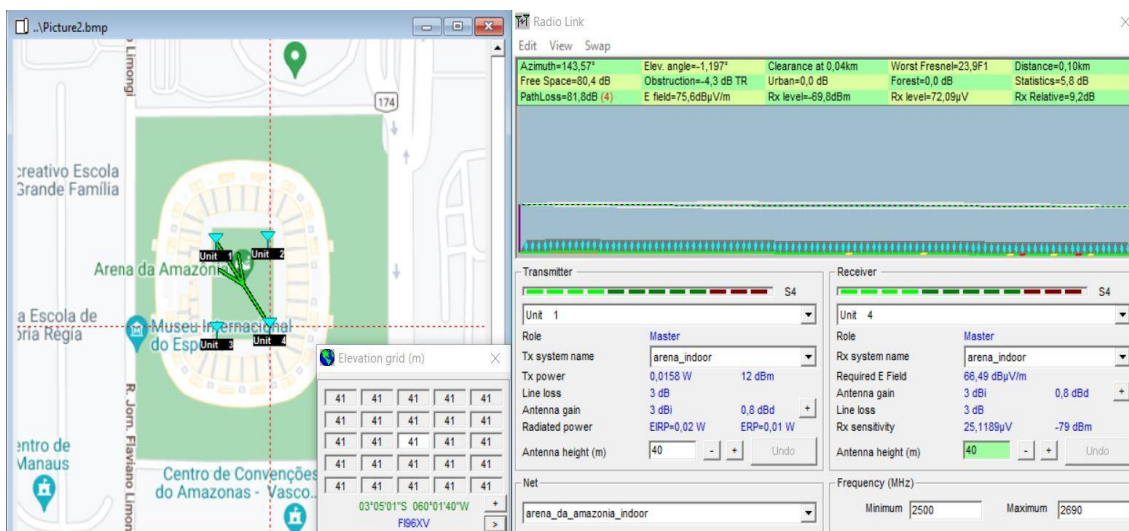


Figura 38 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 1 para Célula 4. Fonte: Autor.

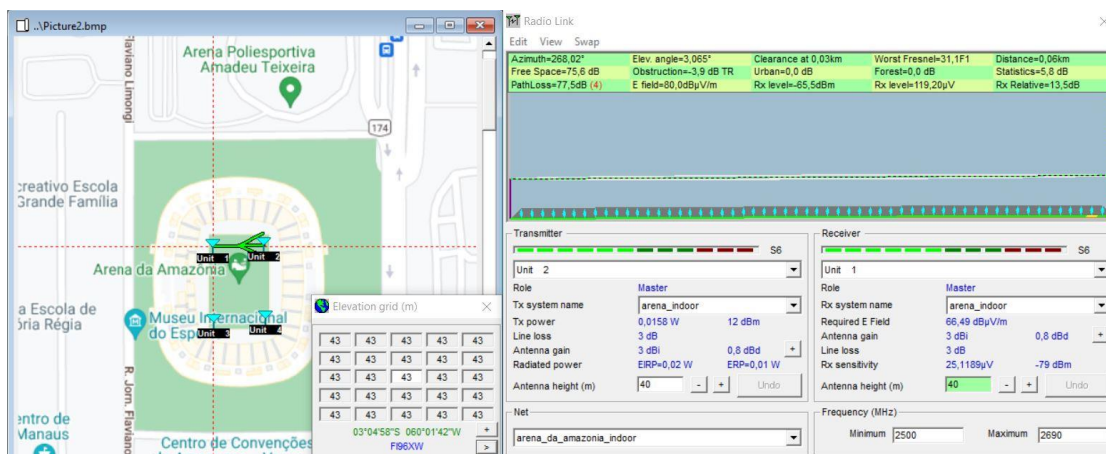


Figura 39 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 2 para Célula 1. Fonte: Autor.

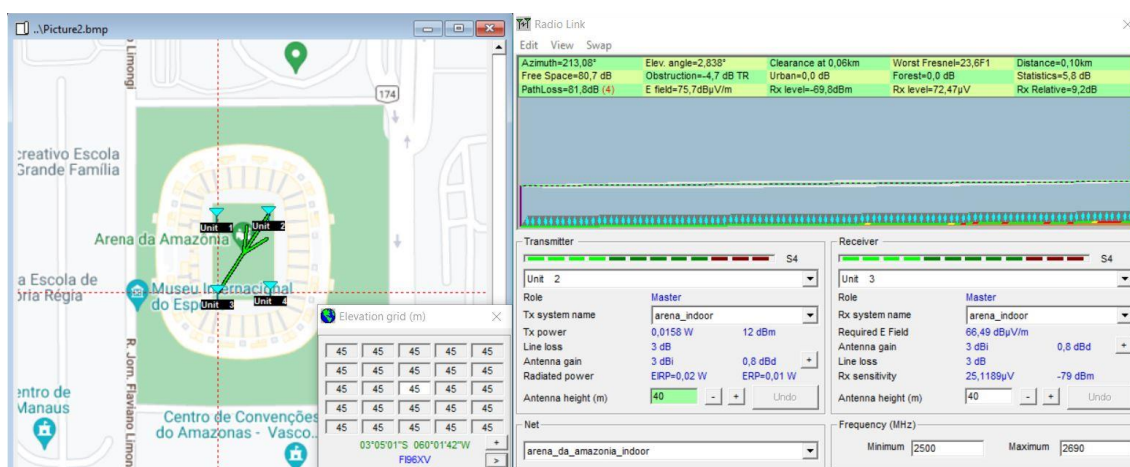


Figura 40 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 2 para Célula 3. Fonte: Autor.

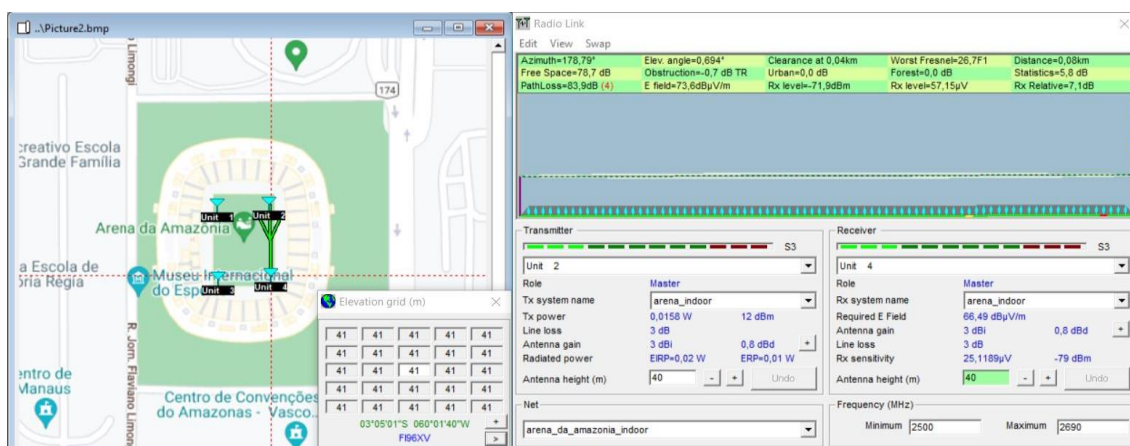


Figura 41 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 2 para Célula 4. Fonte: Autor.

Figura 42 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 1 no RM.

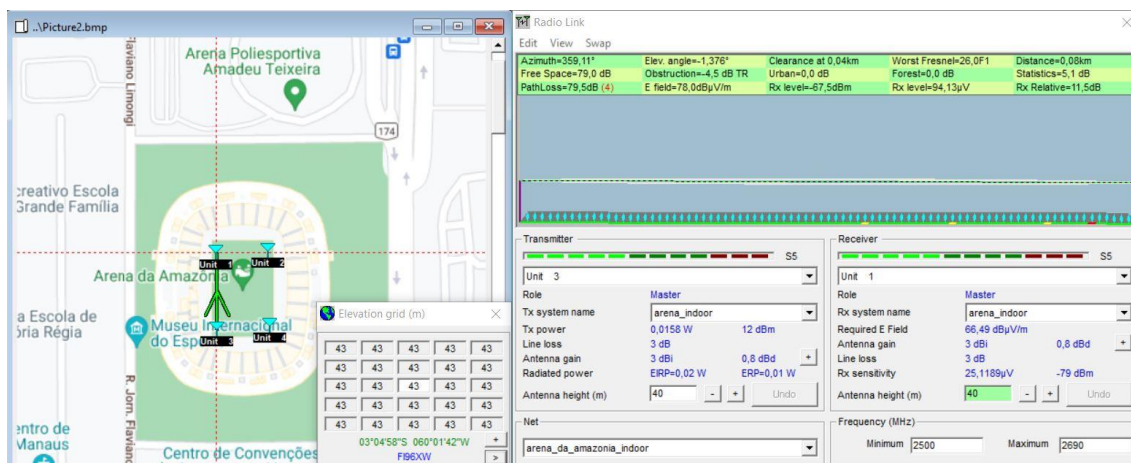


Figura 42 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 1. Fonte: Autor.

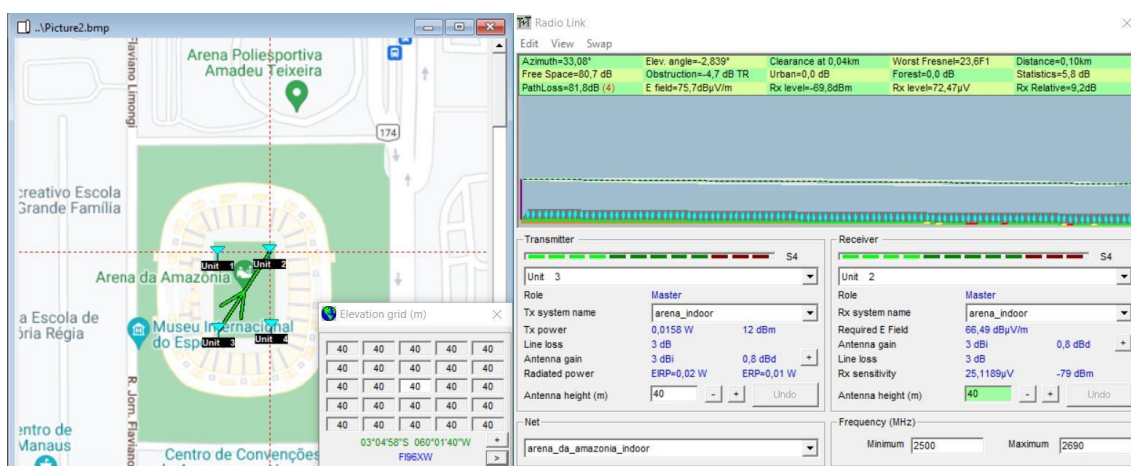


Figura 43 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 2. Fonte: Autor.

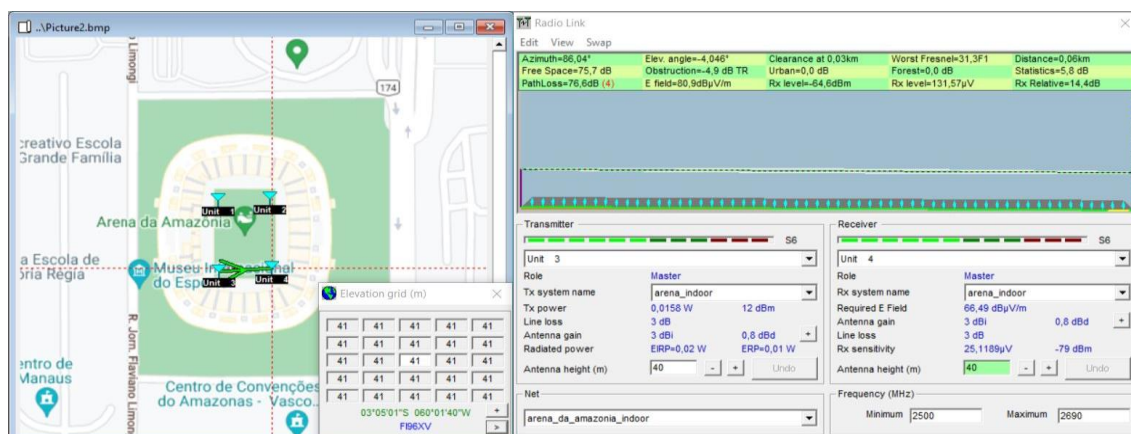


Figura 44 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 3 para Célula 4. Fonte: Autor.



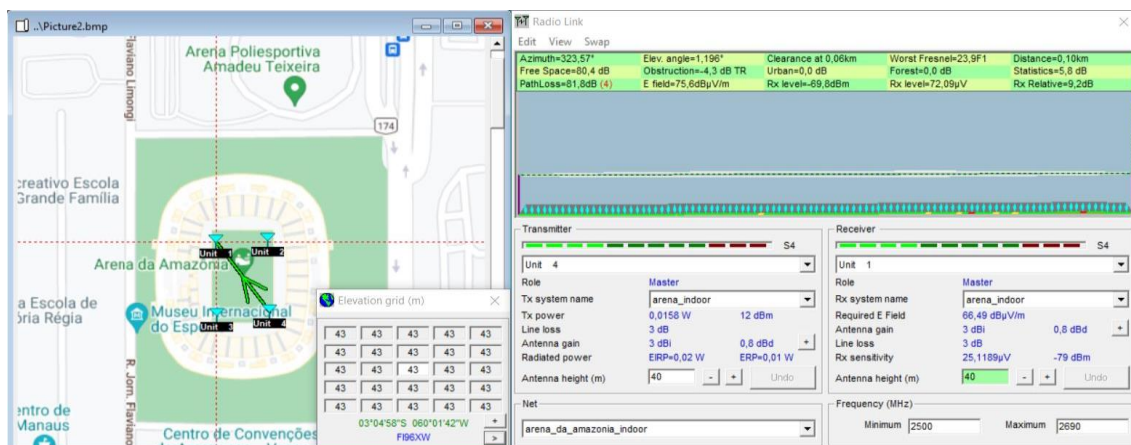


Figura 45 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 4 para Célula 1. Fonte: Autor.

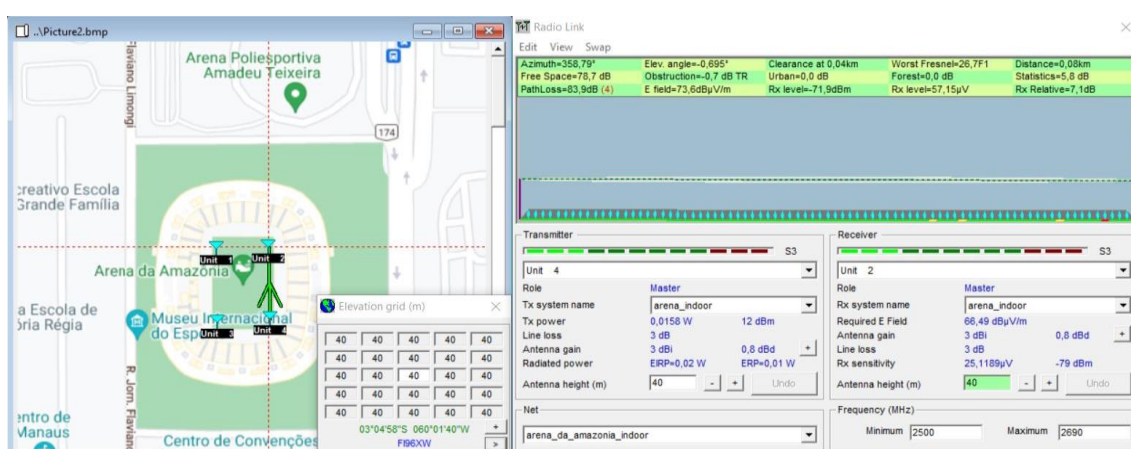


Figura 46– Verificação do Enlace com sentido da Célula 4 para Célula 2. Fonte: Autor.

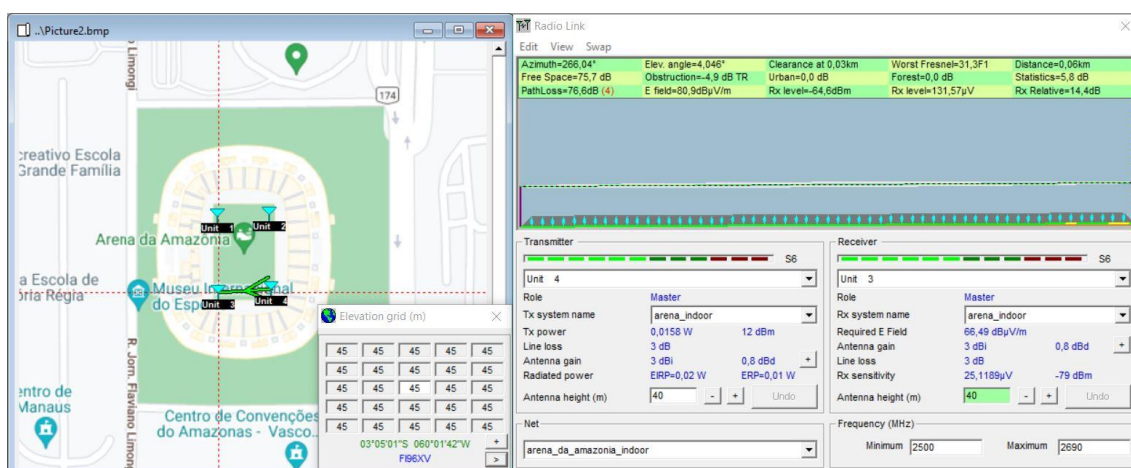
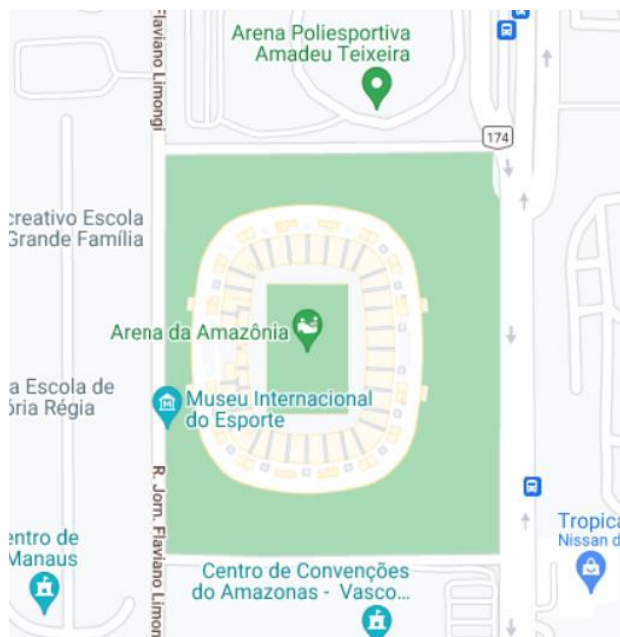


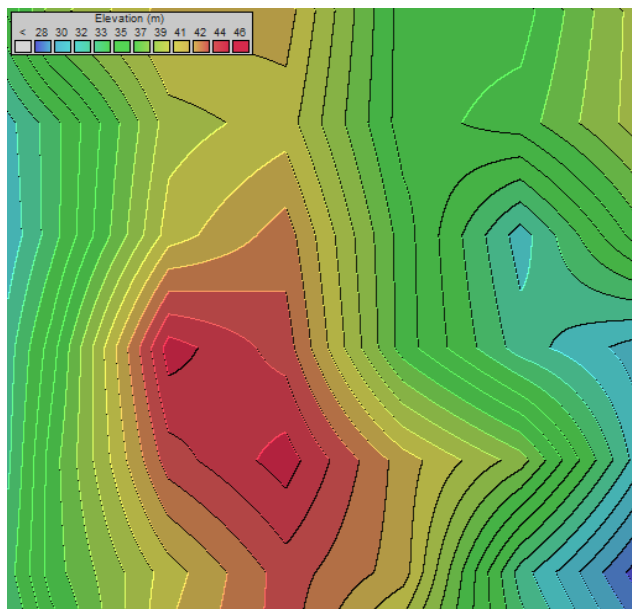
Figura 47 – Verificação do Enlace com sentido da Célula 4 para Célula 3. Fonte: Autor.

Após a verificação de todos os enlaces da rede da arena da amazônia, pode-se colocar a rede em operação na área abaixo, como mostra na Figura 48.



**Figura 48** – Área de Operação da Rede. **Fonte:** Google Maps.

O software *Radio Mobile* tem a capacidade de mapear o relevo da área onde se planeja realizar a cobertura. A área da arena da amazônia, representada na forma de relevo do terreno, é mostrada de acordo com a Figura 49.



**Figura 49** – Relevo da área. **Fonte:** Autor.

Para fator de melhor observação, localização e manipulação dos arquivos de cobertura gerados, o *Radio Mobile* possui a opção de exportar o arquivo de relevo, complementado com os sites e a rede já ativada e verificada, para o

*Google Earth*. Após a exportação do projeto da arena da amazônia para o *Google Earth*, percebe-se na Figura que o ponto mais alto do relevo, local onde está centralizado o gramado da arena, está levemente deslocado da posição mostrada pelo *Google Earth*. Este erro do *Radio Mobile* não é suficiente para prejudicar o projeto de cobertura pois os deslocamentos de relevo possuem desvios pequenos de seus valores reais.



**Figura 50** – Arena da Amazônia com a Rede e Relevos no Radio Mobile. **Fonte:** Autor.

Nota-se a disponibilização estratégica da cobertura nos quatro cantos da arena da amazônia em sobreposição aos diferentes níveis de relevo, fornecidos pelo *Radio Mobile*.

A Figura mostra a rede em funcionamento com enlaces verdes (ativados e funcionando) em uma perspectiva onde se pode analisar a disposição da cobertura em relação aos diferentes níveis da arquibancada.





**Figura 51** – Projeto Completo da Rede LTE na Arena da Amazônia feito no Radio Mobile e visualizado no Google Earth. **Fonte:** Autor.

A Arena da Amazônia é composta por 44300 assentos, onde foi-se capaz de atender simultaneamente 8512 usuários (19,21 % do total). Melhorando assim, a rede interna da área, conforme havia sido proposto.

## 6 Conclusão

O LTE é a tecnologia de quarta geração de comunicações móveis que possibilita maior tráfego de dados e dinamismo na alocação dos recursos de rede, em relação as redes legadas, fazendo uso da técnica de acesso a rede por frequências ortogonais, que possibilita maior tráfego de dados em uma largura relativamente menor de banda.

O Brasil é um país que possui o esporte, mais precisamente o futebol, enraizado em suas culturas, fator que motivou a elaboração deste estudo em relação a cobertura LTE em estádio de futebol.

Devido ao alto número de pessoas comportadas em um espaço relativamente pequeno (aglomeração) e o fato delas serem influenciadas pelos mesmos padrões de comportamento e motivados pelos mesmos eventos (gol, vitória, derrota, etc...), a qualidade da cobertura da rede está sujeita a lapsos em sua credibilidade na garantia da informação, sofrendo quedas de conexão, provendo taxas de comunicação baixa e de qualidade ruim.

Visando a melhoria da qualidade da rede, realizou-se este trabalho para elaborar a cobertura da arena da Amazônia, situada na cidade de Manaus, para prover cobertura ao torcedor da melhor forma possível usando os recursos disponibilizados pelas operadoras de telefonia móvel da região, como Banda 7 do LTE, sendo essa a banda de maior frequência disponível na cidade e largura de banda de 20MHz, maior largura disponível no LTE, bem como a modulação de 64-QAM, capaz de prover altas taxas em relação as outras modulações de ordem mais baixa.

Através de cálculos teóricos e com o auxílio dos SWs Google Earth, MATLAB e Radio Mobile, observou-se que, para os cenários analisados, foi gerado a cobertura da área da arquibancada, de aproximadamente 40.000 m<sup>2</sup>, utilizando 4 sites de 2 setores cada. Portanto, proporcionando cobertura simultaneamente para 8512 torcedores (19,21% do total) que possuem o consumo dados médio diário individual de 80MB (fotos, vídeos, *streamings*).



## 7 Trabalhos Futuros

### 7.1 Pesquisa Sobre Ferramentas e Projetos em 5G

Durante a elaboração deste trabalho, notou-se que o *Radio Mobile* limita-se a realizar projetos de cobertura das gerações 2, 3 e 4. Ciente da evolução das comunicações atuais em relação ao 5G, propõe-se efetuar pesquisas sobre métodos, tecnologias a serem usadas e ferramentas para a elaboração de projetos de cobertura em redes 5G.

### 7.2 Agregação de Resultados Empregando o IoT

Ao se concluir o estudo futuro sobre o 5G mencionado acima, pretende-se recolher conhecimento sobre tecnologias de cobertura de raio menor, dedicadas a um público menor, com capacidade para prover maior taxa e consumir menor potência, tais como pico-células e redes de sensores IoT.

### 7.3 Melhoria da Experiência do Usuário Usando IoT e Redes Móveis

Após a conclusão dos estudos futuros anteriores, pretende-se usar a integração das tecnologias de comunicação móvel e IoT, para prover a melhor experiência ao torcedor em questões que atualmente geram algum transtorno como dificuldades em compra de ingressos, desorganização no processo de acesso a arquibancada e saída do estádio.

## Referências

ADITYAWARMAN, Fajar; FAHMI, Arfianto; USMAN, Uke Kurniawan. ANALISIS PERENCANAAN JARINGAN LTE PICOCELL DI STADION UTAMA GELORA BUNG KARNO. TEKTRIKA - Jurnal Penelitian dan Pengembangan Telekomunikasi, Kendali, Komputer, Elektrik, dan Elektronika, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 48-55, aug. 2019.

WIKIPÉDIA. Geografia de Manaus. 2019. <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia\\_de\\_Manus](https://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia_de_Manus)> Acessado em 18/11/2021.

TELECO. Redes Wireless: Modelos de Propagação. <[https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwirelessrb/pagina\\_2.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwirelessrb/pagina_2.asp)> Acessado em 18/11/2021

Flobak, Einar. "LTE in high capacity locations: - A case study of Lerkendal Stadium." (2018).

Spiller, T. & Nunes, L. & Lopes, Waslon. (2014). Implantação da Rede 4G na Arena Pernambuco. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação. 4. 32-39. 10.12721/2237-5112.v04n02a05.

TELECO2. <<https://www.mobiletime.com.br/noticias/28/08/2019/71-milhoes-de-brasileiros-acessam-a-internet-somente-pelo-celular/>> Acessado em 18/11/2021

TELECO3. <[https://www.teleco.com.br/wimax\\_tecnologia.asp](https://www.teleco.com.br/wimax_tecnologia.asp)> Acessado em 18/11/2021

TELECO4. <[https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentr1/pagina\\_3.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentr1/pagina_3.asp)> Acessado em 18/11/2021

WIMAXUFRJ. <[https://www.gta.ufrj.br/grad/06\\_1/wimax/intro.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/06_1/wimax/intro.html)> Acessado em 18/11/2021

REIS<[https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2014\\_2/rafaelreis/mim o.html](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2014_2/rafaelreis/mim o.html)> Acessado em 18/11/2021

## Anexo

### Anexo A – Código Matlab para solução de equações

```

clear all
close all
clc

%Link Budget de Downlink

p_tx_dl = 12;      %Potência de transmissão
g_tx_dl = 3;      %Ganho de transmissão
l_tx_dl = 3;      %Perdas na transmissão
snr_req_dl = 0;   %Relação sinal/ruído requerida
s_rx_dl = -79;   %Sensibilidade requerida na recepção
g_rx_dl = 0;     %Ganho de recepção
l_rx_dl = 0;     %Perdas na recepção
g_dv_dl = 0;     %Ganho de diversidade
m_dl = 4;        %Margem de desvanecimento

lb_dl = p_tx_dl + g_tx_dl - l_tx_dl - snr_req_dl -
s_rx_dl + g_rx_dl - l_rx_dl + g_dv_dl - m_dl;

%Link Budget de Uplink

p_tx_ul = 13;     %Potência de transmissão
g_tx_ul = 0;     %Ganho de transmissão
l_tx_ul = 0;     %Perdas na transmissão
snr_req_ul = 0;  %Relação sinal/ruído requerida
s_rx_ul = -79;  %Sensibilidade requerida na recepção
Fonte: Série 36104 da 3GPP
g_rx_ul = 3;     %Ganho de recepção
l_rx_ul = 3;     %Perdas na recepção
g_dv_ul = 1;    %Ganho de diversidade
m_ul = 4;       %Margem de desvanecimento

lb_ul = p_tx_ul + g_tx_ul - l_tx_ul - snr_req_ul -
s_rx_ul + g_rx_ul - l_rx_ul + g_dv_ul - m_ul;

%Modelo de predição Stanford University Interim - SUI.
Indicado pelo 3GPP para faixas de frequência entre
2,5GHZ e 3,5 GHZ

%Cálculo da atenuação no espaço livre

```

```

d_0 = 100;           %Distância de referência
v_l = 3e8;           %Velocidade da luz
freq = 2.6e9;        %Frequência da banda 7 LTE (primeira a
ser usada em Manaus e a mais consolidada.
lbd = v_l/freq;      %Comprimento de onda           %

a_el = 20*log10((4*pi*d_0)/lbd);

%Cálculo do Perda do caminho em função da altura da
antena transmissora

%Tipo de terreno escolhido foi o terreno c (plano e sem
vegetação)
a = 3.6;             %Constante de cálculo obtida empiricamente
de acordo com o tipo de terreno
b = 0.005;           %Constante de cálculo obtida
empiricamente de acordo com o tipo de terreno
c = 20;              %Constante de cálculo obtida empiricamente
de acordo com o tipo de terreno
h_b = 40;            %Altura da antenna transmissora

y = a - b*h_b + (c/h_b);

%Cálculo do fator de correção de frequência

%Frequência em MHz

x_f = 6*log10((freq/1000000)/2000);

%Cálculo do fator de correção de da altura da antenna
receptora

h_rx = 1.8;          %altura do usuário

x_h_rx = -20*log10(h_rx/2);

%Cálculo da perda de percurso pelo modelo do SUI

s = 4;              %Desvanecimento de acordo com o terreno

%l_pl = a_el + 10*y*log10(d/d_0) + x_f + x_h_rx + s
%Usa-se os valores calculados no link budget de downlink
e uplink no lugar
%de l_pl nesta equação para encontrar o raio da célula.
Usa-se o menor
%valor, para garantir comunicação em ambos os sentidos.
Portanto, temos:

```

```
%log10(d/d_0) = (lb_ul - a_el - x_f - x_h_rx - s)/(10*y),
portanto,
%d/d_0 = 10^((lb_ul - a_el - x_f - x_h_rx - s)/(10*y)),
logo:
```

%Para calcular o raio do uplink ou downlink basta colocar u ou d no termo "lb\_ul" no cálculo da parcela.

```
parcela = (lb_ul - a_el - x_f - x_h_rx - s)/(10*y);
```

```
d = (10^(parcela))*d_0;
```

```
%Cálculo do número de estações
```

```
%área externa = 50000 m²
```

```
%área interna = 10000 m²
```

```
%área da arquibancada = área externa - área interna =
a_a = 40000m²
```

```
a_a = 0.04;
```

%A área do site us a equação abaixo (usada para áreas hexagonais) para cálculo. Porém ela será instalada na parede interior do estádio, tornando aproximadamente somente 1/3 de sua área utilizável

```
a_s = ((3*sqrt(3)*((d/1000)^2))/2)*(1/3);
```

```
%Cálculo do número de sites
```

```
n_s = a_a/a_s;
```

```
%Trabalho de Conclusão de Curso - Yasmin Thuany Brito
Barbosa
```

```
%
```

```
%"Today is the opportunity to build the tomorrow you
want."
```

```
%-Ken Poirot
```

```
clear all
```

```
close all
```

```
clc
```

```
%Cálculo do throughput
```

%Conforme mencionado no documento, o período de transmissão de um símbolo é de 71,367  $\mu$ s.

```
ts = 71.367e-6;      %Período de símbolo.
b = 6;              %Bits/Símbolo. Usamos 64-QAM para
cálculo a maior capacidade possível em Manaus.
sbp = 1200;         %Número de subportadoras. Usamos BW
= 20 MHz.
tc = 5/6;          %Taxa de codificação
```

```
th = (1/ts)*b*tc*sbp;
```

%Cálculo do fluxo de dados em um site na busy hour

```
q_bh = 90;          %Porcentagem de utilização dos
recursos do site durante a busy hour
```

```
x_bh_c = (th)*3600*(q_bh/100);
```

%Cálculo do fluxo do site no dia

```
y_bh = 40;          %Porcentagem do tráfego da busy
hour em relação ao tráfego diário
```

```
x_d = (x_bh_c*100)/y_bh;
```

%Adotando-se 2 setores por site (site com 2 setores), temos o cálculo do fluxo por site:

```
n_se = 2;          %número de setores por site
```

```
x_si = x_d*n_se;
```

%Cálculo do número de usuários por setor considerando consumo médio diário de 100 MB por usuário

```
v_d = 80e6*8;      %Volume diário médio do tráfego de usuário
```

```
n_u_s = x_d/v_d;
```

%Calculando o número de usuários pelo total de recursos da arena da

%amazônia (4 sites com 2 setores cada = 8 setores)

```
n_t = n_u_s*8;
```

```
%Calculo da porcentagem de usuários que podem ser  
atendidos simultaneamente na arena da amazônia
```

```
n_t_p = 44300;      %Número de pessoas da capacidade da  
arena da amazônia
```

```
n_p_u_s = (n_t/n_t_p)*100;
```