

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - CAMPUS PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES



MATHEUS PADILHA VINHAL

**EVOLUÇÃO DA TELEFONIA MÓVEL CELULAR,
CUMPRIMENTO DE LEIS E ANÁLISE DE MODELOS DE
PROPAGAÇÃO.**

Patos de Minas

2020

MATHEUS PADILHA VINHAL

**EVOLUÇÃO DA TELEFONIA MÓVEL CELULAR,
CUMPRIMENTO DE LEIS E ANÁLISE DE MODELOS DE
PROPAGAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Diego de Brito Piau

Patos de Minas

2020

MATHEUS PADILHA VINHAL

EVOLUÇÃO DA TELEFONIA MÓVEL CELULAR, CUMPRIMENTO DE LEIS E ANÁLISE DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Diego de Brito Piau

Patos de Minas, 01 de setembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.- Orientador - Diego de Brito Piau (UFU)

Prof. Dr. Jeovane Vicente de Sousa (UFU)

Prof.^a. Dra. Karine Barbosa Carbonaro (UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe pelo amor incondicional e apoio em todas as minhas escolhas e decisões de ir além! Ao meu pai pelo gene da Engenharia. Aos meus avós pela humildade, proteção, carinho e exemplo de vida. Às minhas tias pelo companheirismo, presença e cuidados. Eterna gratidão! Aos meus tios pela companhia, amizade, alegria e inspiração no viver! À toda família pelas bênçãos a mim ofertadas. Aos professores pelo aprendizado constante, ao meu orientador Diego pelo conhecimento dado ao longo do curso, aos professores Jeovane e Karine por aceitarem participar da banca e ao laboratório LaPSE por ter me acolhido e disponibilizado o seu espaço para pesquisas. Aos colegas de sala, às amigas e amigos. Enfim, a todos que estiveram comigo nesse caminho e me ajudaram a crescer como pessoa. Obrigado!

RESUMO

É apresentado neste trabalho, a evolução da rede móvel celular, começando desde a Primeira Geração (1G), até a Quinta Geração (5G) que vem em fase de estudos e testes. Então, em cada geração, são abordadas as características mais importantes, como: padronização, faixa de frequência, taxas de *download* e *upload*, latência, modulação, etc. São mostradas também, as principais leis que regem a telefonia móvel, entre elas: o Regulamento do Serviço Móvel Pessoal (SMP), Regulamento de Gestão da Qualidade da Prestação do Serviço Móvel Pessoal (RGQ SMP) e o Procedimento de Fiscalização para Verificação do Cumprimento dos Compromissos de Abrangência e da Área de Cobertura do Serviço Móvel Pessoal, aplicando-os e estudando-os no contexto de qualidade de serviço e sinais, em Lagoa Formosa, com o auxílio do *software*, Net Monitor Lite. Por meio de medições e predições utilizando modelos de propagações, são estudados os sinais recebidos, preditos e é feita uma análise dos resultados obtidos.

Palavras Chave: 1G. 2G. 3G. 4G. 5G. Leis. Redes Móveis. Net Monitor Lite, Modelos de Propagação.

ABSTRACT

It is presented in this work, the evolution of the cellular network, starting from the First Generation (1G), until the Fifth Generation (5G) that comes in phase of studies and tests. So, in each generation, the most important characteristics are addressed, such as: standardization, frequency range, download and upload rates, latency, modulation, etc. The main laws governing mobile telephony are also shown, among them: the Personal Mobile Service Regulation (SMP), the Quality Management Regulation of the Personal Mobile Service Provision (RGQ SMP) and the Inspection Procedure for Verification of Compliance the Coverage Commitments and the Coverage Area of the Personal Mobile Service, applying and studying them in the context of quality of service and signals, in Lagoa Formosa, with the help of the software, Net Monitor Lite. Through measurements and predictions using propagation models, the received and predicted signals are studied and an analysis is made of the results obtained.

Keywords: 1G. 2G. 3G. 4G. 5G. Laws. Mobile networks. Net Monitor Lite. Models Propagation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Alocação de frequências no espectro para o padrão AMPS	18
Figura 2.2 - Decaimento e ponto de interseção derivados de medidas reais	35
Figura 2.3 - Exemplos de modelos para determinar altura efetiva da antena	36
Figura 2.4 - Visada direta entre Base e Móvel	38
Figura 2.5 - Visada indireta entre Base e Móvel	39
Figura 2.6 - Curva de atenuação média relativa ao espaço livre	41
Figura 2.7 - Fator de correção para diferentes tipos de terreno	42
Figura 2.8 - Indicadores do regulamento RGQ SMP.....	46
Figura 3.1 - Interface do <i>software</i> Net Monitor (Menu Inicial)	49
Figura 3.2 - Interface do <i>software</i> Net Monitor (Gráficos)	50
Figura 3.3 - Intensidade celular em uma coordenada de Lagoa Formosa-MG	51
Figura 3.4 - Recuperação de frequência – ANATEL	51
Figura 3.5 - Torre da empresa TIM Celular	52
Figura 3.6 - Torre da empresa Algar Telecom	52
Figura 4.1 - Medições da Algar no bairro Planalto	54
Figura 4.2 - Medições da TIM no bairro Planalto	54
Figura 4.3 - Medições da Algar Telecom no bairro Centro	66
Figura 4.4 - Medições da TIM no bairro Centro	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Valores de RSRQ e RSSNR para Algar e TIM	64
Gráfico 4.2 – Valores de RSRP medidos e calculados no bairro Planalto	65
Gráfico 4.3 – Valores de RSRQ e RSSNR para Algar e TIM	67
Gráfico 4.4 – Valores de RSRP medidos e calculados no bairro Centro	68
Gráfico 4.5 – Métricas de Erros: MAD, MSE, RMSE	69
Gráfico 4.6 – Taxa de Conexão de Dados (2G,3G,4G) em Lagoa Formosa	70
Gráfico 4.7 – Taxa de Desconexão de Dados (2G,3G,4G) em Lagoa Formosa	70
Gráfico 4.8 – Taxa de Conexão de Dados (4G) em Lagoa Formosa	70
Gráfico 4.9 – Taxa de Desconexão de Dados (4G) em Lagoa Formosa	71
Gráfico 4.10 – Taxa de Conexão de Dados (4G) – UF MG	71
Gráfico 4.11 – Taxa de Desconexão de Dados (4G) – UF MG	71
Gráfico 4.12 – Taxa de Conexão de Voz em Lagoa Formosa	72
Gráfico 4.13 – Taxa de Desconexão de Voz em Lagoa Formosa	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Decaimento e ponto de interseção derivados de medidas reais	34
Tabela 2.2 – Fator de ajuste de frequência A_f	35
Tabela 4.1 – Medição realizada por <i>drive test</i> para operadora Algar	55
Tabela 4.2 – Medição realizada por <i>drive test</i> para operadora TIM	56
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Lee para Algar	57
Tabela 4.4 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Lee para TIM	58
Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Okumura para Algar	59
Tabela 4.6 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Okumura para TIM	60
Tabela 4.7 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Hata para Algar	61
Tabela 4.8 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Hata para TIM	62
Tabela 4.9 – Potência recebida pelo <i>drive test</i> e pelos modelos de propagação	63
Tabela 4.10 – Estatísticas dos sinais recebidos RSRP	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G - Primeira Geração de Redes Móveis

2G - Segunda Geração de Redes Móveis

3G - Terceira Geração de Redes Móveis

3GPP - *Third Generation Partnership Project*

3GPP2 - *Third Generation Partnership Project 2*

4G - Quarta Geração de Redes Móveis

5G - Quinta Geração de Redes Móveis

AMPS - *Advanced Mobile Phone Services*

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

BCCH - *Broadcast Control Channel*

CAPEX - *Capital Expenditure*

CDMA - *Code Division Multiple Access*

CPICH - *Stands for Common Pilot Channel*

CSD - *Circuit Switched Data*

EDGE - *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*

FDMA - *Frequency Division Multiple Access*

FSK – *Frequency Shift Keying*

GSM - *Global System for Mobile Communications*

GPRS - *General Packet Radio Service*

HARQ - *Hybrid Automatic Repeat Request*

HSCSD - *High Speed Circuit-Switched Data*

HSDPA - *High Speed Downlink Packet Access*

HSPA - *High Speed Packet Access*

HSPA+ - *High Speed Packet Access Evolution*

HSUPA - *High Speed Uplink Packet Access*

IoT - *Internet of Things*

ITU - *União Internacional de Telecomunicações*

JTACs - *Japanese Total Access Communication System*

LTP - *Long Term Predictor*

LTE - *Long Term Evolution*

MIMO - *Multiple Input Multiple Output*

NMT - *Nordic Mobile Telephony*

OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

OPEX - *Operational Expenditure*

QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*

RC2000 - *RADIOCOM2000*

REL P - *Residual Excited Linear Predictive*

RGQ – *Regulamento Geral de Qualidade*

RSRP - *Received Signal Reported Power*

RSRQ - *Received Signal Reported Quality*

RSSI - *Received Signal Strength Indication*

RSSNR - *Received Signal Signal Noise Ratio*

SON - *Self Organizing Network*

SMS - *Short Message Service*

SPM - *Serviço Móvel Pessoal*

SWIPT - *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*

TACS - *Total Access Communication System*

TCC1 - Trabalho de Conclusão de Curso 1

TCC2 - Trabalho de Conclusão de Curso 2

TDMA - *Time Division Multiple Access*

VoIP - *Voice Over Internet Protocol*

WCDMA – *Wide Band Code Division Multiple Access*

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivos Gerais	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 Justificativa	16
Capítulo 2 – Revisão da Literatura	17
2.1 Evolução das Tecnologias de Redes Móveis	17
2.1.1 Tecnologia 1G	17
2.1.2 Tecnologia 2G	19
2.1.3 Tecnologia 3G	21
2.1.4 Tecnologia 4G	24
2.1.5 Tecnologia 5G	26
2.2 Parâmetros de Desempenho e Qualidade de Sinal Recebido	30
2.2.1 Indicadores de desempenho do sinal	30
2.3 Predição de propagação do Sinal	32
2.3.1 Introdução	32
2.3.2 Modelo de propagação de Lee	33
2.3.3 Modelo de propagação de Okumura	39
2.3.4 Modelo de propagação de Hata	42
2.4 Legislações das Redes Móveis	44
2.4.1 Normatização do SMP	44
2.4.2 Regulamento SMP	44
2.4.3 Regulamento RGQ SMP	45
2.4.4 Fiscalização do Cumprimento de Sinais Recebidos	47
Capítulo 3 – Materiais e Métodos	48
3.1 Materiais utilizados e métodos adotados	48
3.1.1 Pesquisa bibliográfica	48
3.1.2 Ferramentas de trabalho e métodos de aplicação	48
3.1.3 Cobertura da região estudada	50
3.1.4 Informações das torres celulares e antenas	51

Capítulo 4 – Resultados e Análises	53
4.1 Resultados das medições e predição do sinal	53
4.1.1 Rotas percorridas na região do bairro Planalto	53
4.1.2 Rotas percorridas na região do Centro.....	66
4.1.4 Metricas de Erros.....	66
4.2 Verificação do cumprimento de Indicadores de Qualidade	69
4.2.1 Resultados da pesquisa.....	69
4.3 Conclusão dos resultados	74
4.3.1 Análise geral.....	74
Capítulo 5 – Conclusões, contribuições e trabalhos futuros	75
REFERÊNCIAS.....	77

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo, é descrita uma breve introdução, sobre telefonia móvel celular, as gerações de redes móveis, além de dos os objetivos gerais e específicos, justificativa e hipótese deste trabalho.

A rede de telefonia móvel celular é uma rede de telecomunicações projetada com a finalidade de oferecer serviços de telefonia aos usuários, funcionando por meio de um sistema de comunicação sem fio, utilizando ondas eletromagnéticas. Ao longo dos anos a telefonia móvel vem evoluindo cada vez mais, para que haja uma melhor comunicação, fazendo parte da vida de várias pessoas. Cada geração de redes móveis é caracterizada por diferentes bandas de frequência e aumento na taxa de dados.

Para que cada geração de redes móveis, seja acessível aos usuários, com qualidade de serviços e sinais aceitáveis, há uma agência reguladora vinculada ao Governo Federal, a Agência Nacional de Telecomunicações, mais conhecida como ANATEL, e uma de suas atribuições é regulamentar o setor de telefonia móvel. Uma pesquisa feita pela ANATEL, relata que a base de linhas ativas de telefonia móvel no Brasil em operação era de 228,64 milhões até o mês de maio de 2019, ou seja, a demanda de usuários é muito alta e requer uma atenção muito grande, para que este tipo de serviço seja entregue com qualidade, uma vez que, os usuários estão mais exigentes e querem garantia de comunicação, a qualquer momento e no máximo de lugares possíveis [1].

Na primeira geração de redes móveis (1G), havia um sistema totalmente analógico, que permitia somente a transmissão de voz. Com a necessidade de melhorias e tornar o sistema mais comerciável e acessível houve a segunda geração de redes móveis, migrando do sistema analógico para o sistema digital, implementando além do serviço de voz, o serviço de mensagens de texto (SMS), transferência de dados e o acesso à internet móvel. Na terceira geração de redes móveis (3G) há os mesmos serviços disponibilizados no 2G, mas com grandes melhorias, tanto nos serviços de voz quanto na taxa de velocidade para acesso à internet, possuindo maior imunidade à interferências. A quarta geração de redes móveis (4G), evoluiu o que já tinha no 3G, aumentando ainda mais a transferência de dados, possuindo uma melhor utilização do espectro de frequência, uma arquitetura

mais simplificada, diminuindo consumo de energia para o terminal móvel, entre outras coisas [2].

De acordo com um levantamento feito pela ANATEL, em Maio de 2019, 5570 municípios foram atendidos pelo 2G, 5471 municípios são atendidos pelo 3G e 4621 são atendidos pelo 4G. Comparando com os anos anteriores a tecnologia 2G manteve sua cobertura, enquanto houve um aumento a cada ano das tecnologias 3G e 4G [4].

Já em fase de estudos, a quinta geração de redes móveis (5G), segundo a União Internacional de Telecomunicações, deverá ter um padrão comercializável até o final de 2020. Com a chegada do 5G, será possível implantar novos serviços, aplicativos de baixa latência em tempo real, maior conectividade, velocidade chegando na casa dos Gbit/s, maior potência e maior cobertura. O alto acesso de banda deverá estar disponível em toda rede, em toda cobertura, e não só no centro de uma cidade, como também na periferia e na área rural [3].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Estudar as tecnologias de redes móveis já implantadas e os avanços obtidos na criação e implantação do 5G, possibilitando uma visão de como será essa nova tecnologia.

Estudar as leis que abrangem as redes móveis, bem como o cumprimento destas, verificando a qualidade dos serviços e sinais das operadoras.

1.1.2 Objetivos Específicos

Levantar aspectos importantes do 1G, 2G, 3G, 4G e o que está sendo estudado para implantação do 5G, tudo isso, englobando espectro de frequências, potenciais casos de uso, padronização e tecnologias. Para o 5G será determinado quais serão os desafios futuros para a implantação, requisitos estratégicos para o desenvolvimento, entre outros aspectos importantes, analisando e explicando cada um.

Verificar o cumprimento de leis, serviços e qualidade dos sinais em diversas áreas das operadoras, em Lagoa Formosa.

1.2 Justificativa

É de extrema importância, estudarmos sobre todas as gerações de redes móveis, bem como o que deve ser cumprido pelas operadoras, isso pelo fato de estar constantemente presente no nosso dia a dia, sendo assim, tornando-se um trabalho muito viável e de grande aprendizado para vida pessoal.

Como vimos anteriormente, por meio de pesquisas feita pela ANATEL, existe uma grande demanda de usuários, e para entregar os serviços de telefonia com qualidade e alta disponibilidade, será implantada uma nova tecnologia, que é a 5G, trazendo vários benefícios, para sociedade, com uma gama muito grande de aplicações. Então, esta tecnologia do futuro, é de grande relevância para nós, tornando-se extremamente viável o seu estudo para uma melhor compreensão, acompanhando o seu estágio de desenvolvimento, nos proporcionando uma visão ampla do que estará por vir.

Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Neste capítulo será apresentado uma revisão da literatura, descrevendo sobre as tecnologias 1G ao 5G, modelos de predições de sinal e legislações de Redes Móveis.

2.1 Evolução das Tecnologias de Redes Móveis

Nesta seção veremos a evolução das redes móveis, da tecnologia 1G até a 5G.

2.1.1 Tecnologia 1G

A implantação da telefonia móvel (sem fio), se deu com o surgimento da primeira geração de redes móveis (1G) na década de 1980, chegando no Brasil somente em 1990, com o padrão AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), portando um sistema analógico para apenas transmissão de voz, sujeito a ruídos e interferências, deixando a qualidade da ligação muito baixa, podendo acontecer ligações cruzadas. A capacidade de usuários era limitada, os terminais eram grandes e pesados, não havia segurança, e era muito pouco comerciável [2].

Vários padrões foram implementados, mas com diferentes requisitos e parâmetros, impossibilitando a comunicação entre eles. Como por exemplo temos: o AMPS adotado por Estados Unidos, Austrália e Brasil, o TACS (*Total Access Communication System*) adotado por Irlanda, Inglaterra, Hong Kong, o NMT (*Nordic Mobile Telephony*) adotado por Rússia, Dinamarca, Noruega, Suécia, Finlândia, o RC2000 (*RADIOCOM2000*) adotado pela França, o RTM (*Radio Telefono Mobile*) adotado pela Itália, o C450 adotado na Alemanha, o JTACs (*Japanese Total Access Communication System*) e o NTT (*Nippon Telegraph and Telephone*) adotado pelo Japão [2].

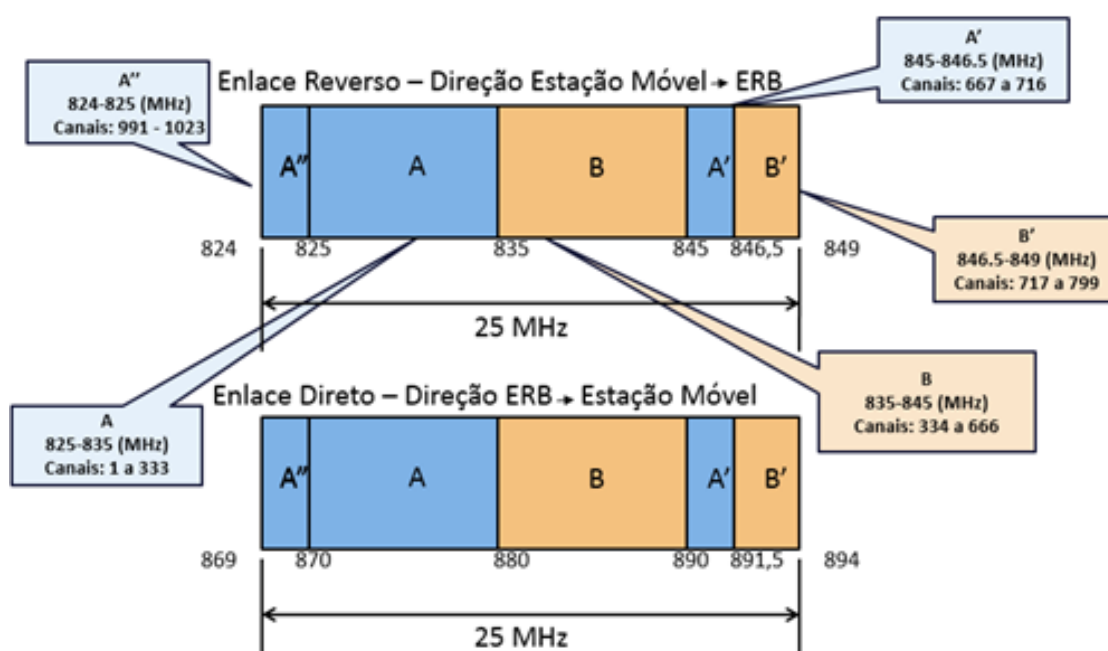
Na 1G, atualmente extinta, seu sistema analógico usava canais de voz de Modulação em Frequência (FM), onde a voz do usuário era transmitida em radiofrequência, na faixa de UHF. Para os canais de controle de modulação, era usado o FSK (*Frequency Shift Keying*), ou seja, uma modulação por chaveamento de frequência. Antes de ocorrer a modulação FM, o sinal de voz era processado por meio

de um *compander*, logo em seguida passava por um filtro pré-ênfase, um limitador de desvio e por final um filtro passa baixas pós limitador [5].

O AMPS, utilizava a tecnologia FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) para se comunicar, ou seja, um método de acesso ao canal baseado na divisão da banda de frequência, onde cada faixa do canal era de 30kHz. A frequência de operação era de 800MHz, e como a demanda começaria a ser grande, este sistema foi aperfeiçoado com 25 MHz de banda passante para o enlace direto (869 – 894 MHz), e mais 25 MHz para o enlace reverso (824 – 849 MHz). Percebe-se então que existe uma separação entre transmissão e recepção de 45 MHz pois era necessária uma banda de guarda e afastamento duplex, para melhor alocação, com menores interferências. Ao todo, existe um sistema com 832 canais, sendo separados $2 \times 21 = 42$ canais para controle. Vale ressaltar que o canal do usuário era composto das duas bandas associadas ao par de portadoras (*uplink* e *downlink*) [6].

Na Figura 2.1, podemos ver simplificado a alocação de frequências no espectro, para duas operadoras, com bandas denominadas A e B, onde há as bandas expandidas A', A'' e B', para conseguirmos os 832 canais, sendo assim cada operadora possuía 416 canais bidirecionais. Os canais de números 800 a 990 não foram incluídos, sendo destinados a outras aplicações [7].

Figura 2.1 - Alocação de frequências no espectro para o padrão AMPS.



Fonte: de acordo com [7].

2.1.2 Tecnologia 2G

Em 1990, surgiu em vários países, a segunda geração de redes móveis (2G), deixando de lado o sistema analógico e migrando para um sistema digital, sendo mais estável, com maior imunidade a ruídos, novas formas de múltiplo acesso melhorando a eficiência espectral, roaming internacional, tráfego de dados na rede, serviço de mensagens, podendo ser implantadas codificações do sinal, com maior acessibilidade para população e abrangendo uma maior área de cobertura [2] e [6].

Na 2G, havia um objetivo de ter um padrão universal, mesmo assim, muitos foram implementados. Dentre os padrões mais usados, existem aqueles que utilizam Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA), que são o GSM (*Global System for Mobile Communications*), o IS-154, que posteriormente evoluiu para IS-136, também chamado de DAMPS (*Digital Advanced Mobile Phone System*), por possuir mesma largura de banda para os canais de Rádio Frequência (RF), e o padrão japonês PDC (*Personal Digital Celular*). Também existe o padrão IS-95, CDMA One ou TIA-EIA-95 desenvolvido pela empresa estadunidense Qualcomm, que foi o primeiro a utilizar tecnologia baseada em Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA) para enviar informações de voz, dados e sinalização, foi muito empregado na América do Norte, América do Sul, China e Austrália [2], [6] e [8].

Houve uma evolução dos padrões, onde o principal objetivo foi dar um melhor suporte para maiores taxas de transmissão de dados para navegação, onde o GSM evoluiu para o GPRS (2.5G), que posteriormente evoluiu para EDGE (2,75G) e também houve uma evolução do GSM para o HSCSD (2.5G). Já o padrão IS-95, evoluiu para o IS-95B [8].

Somente em 2001, a Anatel liberou uma licença para que o padrão GSM desenvolvido pelos países Europeus, começasse a ser implantado no Brasil, onde cada operadora tem licença para operar em uma determinada frequência. Vale ressaltar que a transição do 1G para o 2G no Brasil, foi uma transição muito lenta, pois os aparelhos celulares que antes funcionavam no 1G, não funcionavam no 2G, pois o padrão AMPS não é compatível com o GSM, necessitando a troca do aparelho antigo por um novo. As bandas usadas para o 2G no Brasil são B8 de 900MHz, B3 de 1800MHz e B2 de 1900Mhz [9] e [43].

O Sistema Global para Comunicações Móveis, mais conhecido, como padrão GSM (*Global System for Mobile Communications*), criado pela ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), foi o pioneiro na utilização da modulação digital, bem como as arquiteturas e serviços de redes. Este, usa uma combinação das técnicas de acesso FDMA e TDMA estruturada, onde a portadora chamada de ARFCN possui largura de banda de 200kHz, permitindo 8 usuários em cada slot de tempo (janelas) para dois canais de 200kHz. Cada janela dura cerca de 577 μ s [8], [10] e [11]. A modulação usada é a GMSK, que é um tipo de modulação FSK. Esta é uma modulação em fase e amplitude constante, onde há um filtro de modelagem de pulso gaussiano com largura de banda de 3dB, relacionado com a taxa de bits. A taxa de transferência do canal é de 270,833 kbps, que é quatro vezes o deslocamento da portadora de RF [6], [8] e [12]. O Codificador de voz é baseado no Codificador Preditivo Linear Excitado por Resíduo (RELP), com um Preditor de Longa Duração (LTP), sendo disponibilizado 250 bits para cada bloco de 20ms de voz, gerando um codificador com uma taxa de bits de 13 Kbps. O acesso à rede era dado por meio do sistema CSD (*Circuit Switched Data*), permitindo conexões a 9.6 kbits, que possuía tarifas por minutos usados, como era muito lento, só era viável para tarefas como e-mails e mensagens de textos [13]. Nesse padrão, os celulares necessitam de um dispositivo de memória que armazena informações, chamado de Módulo de Identificação do Assinante, ou mais popularmente conhecido como SIM, ou chip. O chip SIM, possui um número de identificação do usuário, bem como informações das redes, chaves de privacidade e outras informações do usuário. A comunicação de dados entre o celular e o provedor de telefonia são criptografadas, o transmissor GSM envia chaves de criptografia no fluxo de bits na transmissão, permitindo uma maior segurança e privacidade. Aplica-se o conceito de *handover* ou *handoff*, a estação base monitora o celular, para quando o nível de potência do sinal estiver no limiar de cobertura, haja uma transferência de célula, migrando para uma, com melhor qualidade de sinal. Neste sistema existem, alguns canais de controle muito importantes, como Canal de Controle de Radiodifusão (BCCH), Canal de Sincronismo (SCH), Canal de Correção de Frequência (FCCH) [8] e [14].

O padrão HSCSD (*High Speed Circuit-Switched Data*), ou seja, Dados de Alta Velocidade em Circuitos Comutados, modulam dados em canais de voz, utiliza comutação por circuito e possui taxa de download típica de 48kb/s, mas podendo chegar ao máximo 57,6 Kbps. Durante toda uma chamada, o usuário permanece em

apenas um canal físico. É baseado no padrão GSM, mas não foi muito bem aceito, devido fazer comutação por circuitos, sendo assim cobradas taxas de acordo com o tempo de uso, sendo rapidamente substituído por padrões mais versáteis, que oferecem maiores taxas de dados e são mais econômicos [15].

O padrão GPRS (*General Packet Radio Service*), ou seja, o Serviço Geral de Radiocomunicação por Pacote, utiliza múltiplos *slots* de tempo, mas esses permanecem ativos apenas quando há envio ou recebimento de dados, fazendo uma comutação de pacotes. O acesso à rede de internet melhorou, possuindo tarifas baseadas no volume de dados transferidos pelo usuário. Quando os 8 slots de tempo são dedicados a um usuário individualmente, é possível, alcançar teoricamente até 171,2 kbps (8 *slots* x 21,4 kbps de vazão de dados), mas normalmente não ultrapassa os 80 Kb/s, pois depende de vários fatores. Possui latência de 700ms [13] e [16].

O padrão EDGE (*Enhanced Data Rates For GSM Evolution*), ou seja, Taxas de Dados Aprimoradas para a Evolução do GSM, surge como uma evolução do GPRS, mas possui uma nova modulação, chamada de 8PSK, sendo possível colocar a mesma quantidade de informação no mesmo canal de 200kHz usado no GSM, fazendo com que haja uma evolução significativa de taxa de download. A velocidade máxima teórica é de 547,2 Kbps, embora dificilmente ultrapasse 384 Kbps. Este padrão, usa um algoritmo de adaptação de taxa que se adapta ao esquema de modulação e codificação (MCS) de acordo com a qualidade do canal de rádio, selecionando aquele com melhor performance. O EDGE não requer mudanças de hardware ou software nas redes principais do GSM. Possui latência de 300ms [17], [18] e [19].

2.1.3 Tecnologia 3G

A Terceira Geração de Redes Móveis (3G) surgiu em meados de 2001 no Japão, e começou a ser oferecida no Brasil somente em 2004, mas somente a partir de dezembro de 2007, por meio de um leilão das faixas de frequências, a expansão dessa tecnologia em território nacional, foi viabilizada. As bandas usadas para o 3G no Brasil são B1 de 2100MHz e B5 de 850MHz [9] e [39].

Com a evolução, para esta geração, viabilizou-se ainda mais o acesso de imagens, áudio, vídeo, multimídia, via internet. A internet passou a ter alta velocidade, se comparada ao 2G, inicialmente chegando em até 2Mbps, em ambientes indoors.

E não, somente os celulares passaram ter essa tecnologia, como também modems para serem conectados em computadores, por meio de portas PCMCIA e USB [20].

Os principais padrões desta geração, definidos pela ITU (União Internacional de Telecomunicações), como padrões IMT-2000, são o *IMT-DS Direct-Sequence* conhecido como W-CDMA ou UTRA-FDD, o *IMT-MC Multi-Carrier* também conhecido como CDMA2000, sendo o sucessor do 2G CDMA (IS-95), o *IMT-TD Time-Division* que engloba o TD-CDMA TD-SCDMA, *IMT-SC Single Carrier* também conhecido como EDGE evoluído, o *IMT-FT Frequency Time* conhecido como DECT e o IMT-OFDMA TDD WMAN conhecido como *WiMAX*. Atualmente o IMT-2000 é dividido em duas organizações: 3GPP e 3GPP2. A organização 3GPP controla os padrões descendentes do GSM e a organização 3GPP2, aqueles baseados no CDMA, usados principalmente na América do Norte e na Coreia do Sul [8] e [9]. O 3GPP2 é composto pelos padrões CDMA 2000-1xRTT, CDMA 1xEV-DV, CDMA 2000-3xRTT. Já o 3GPP é composto pelo WCDMA, TD-SCDMA e o EDGE. A partir do padrão WCDMA, também passado a chamar de UMTS, houve evoluções surgindo o HSPA, se atualizando para HSDPA e HSUPA, gerando maiores taxas de download e upload, respectivamente. A partir daí, ainda surge outra atualização deste padrão, sendo registrado com o nome de HSPA+. E é este, o padrão que é adotado, atualmente por todas as operadoras nacionais [8] e [21].

O WCDMA é um padrão que possui compatibilidade com versões anteriores dos serviços como o GSM, EDGE e IS-136, permitindo uma transição perfeita entre padrões. Este padrão possui dois modos de operação, podendo alternar ao que seja mais adequado a cada situação. Um modo é a Duplexação por Divisão de Tempo, onde *downlink* e *uplink* possuem mesma portadora, mas com slots diferentes, e o outro é a Duplexação por Divisão de Frequência, possuindo portadoras diferentes. Outra diferença para outros padrões, é uma alocação de espectro mínimo de 5MHz, que usa modulação QPSK para *downlink* e BPSK para *uplink*, possuindo um controle rápido de potência adaptativa no *downlink*. A taxa de dados pode chegar até 2 Mbps, latência de 200ms e passa usar técnicas de espalhamento espectral [6] e [8].

O HSPA é um avanço da tecnologia 3G em relação a WCDMA, sua sigla significa *High Speed Packet Access* ou acesso a pacotes em alta velocidade. O HSPA, também, é popularmente conhecido como 3.5G, então, nessa estrutura, conseguimos atingir maiores velocidades do que a gente possuía e suportar uma quantidade maior de usuários. O HSPA é baseado na tecnologia UMTS, e como é basicamente uma

melhoria no acesso, não é necessário fazer modificações na rede central UMTS, apenas uma melhora na infraestrutura, para comportar o aumento no fluxo de dados, não precisa substituir antenas e nem licenciar novas faixas de frequência. Como o sistema fornece serviços de dados por pacotes, então, estes possuem elevadas taxas de dados, baixos atrasos enquanto, ao mesmo tempo, mantêm uma boa cobertura, fornecendo alta capacidade. A base do HSPA, é por meio de duas tecnologias, o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) e o HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). Então o HSDPA, e o HSUPA não são concorrentes, eles são complementares. Ambos trabalham utilizando portadoras de 5 MHz, mas o HSDPA se direciona ao *download*, enquanto que o HSUPA, além deste aspecto, se foca também no *upload* [21], [23], [24] e [25].

O HSDPA permite taxas de dados de até 14,4 Mbps no *downlink*, e 2,0 Mbps no *uplink*, além de possuir um menor intervalo no tempo de transmissão, chegando a 2 ms, aumentando assim, a sensibilidade para detecção de variações na rede e diminuindo o tempo de *roundtrip*, que é o tempo gasto para que a informação chegue ao destinatário e o remetente receba uma mensagem de confirmação. O tempo gasto, para levar um pacote de dados, a um outro ponto, também diminuiu, ou seja, agora possui uma menor latência, chegando a 130ms. Com isso, existe um tempo de resposta menor e alocação de recursos mais ágil. Outra característica importante é o escalonamento rápido de pacotes ortogonal, fazendo com que a rede se adapte às variações da qualidade e disponibilidade de sinais oferecidos, priorizando àqueles usuários que tenham as condições de um canal mais favorável. Aqueles pacotes enviados com erros, são salvos pelo usuário e depois combinados com outros que são retransmitidos por meio do protocolo HARQ, em até 10ms, sendo possível, todos pacotes com erros gerarem um pacote sem erro. Neste padrão ocorrem a modulação e codificação adaptativas, conforme a qualidade do sinal do usuário, ocorre a variação. Caso a qualidade esteja mais baixa a modulação é a QPSK, mas caso a qualidade seja muito boa, a modulação muda para 16-QAM, podendo dobrar as taxas de transmissão, com um a canal maximizado [21], [23], [24] e [25].

O HSUPA, também conhecido como *Enhanced Uplink* (EUL) é uma evolução complementar do HSPDA, ele continua usando o protocolo HARQ, e intervalo no tempo de transmissão de 2ms. Mas o grande diferencial é possibilitar maiores taxas de dados de *uplink*, chegando até 5,76 Mbps devido aos dados de diferentes usuários passarem ser realizados em um canal dedicado. A taxa de *downlink* de até 14,4 Mbps,

a modulação usada é a QPSK e o escalonamento de pacotes ocorre de maneira diferente do HSDPA, onde o usuário envia um pedido de transmissão, e o escalonador decide quem envia e o quanto cada um envia [21], [23], [24] e [25] e [26].

O HSPA+, também conhecido como HSPA Evolution e HSPA 3,75G é um padrão de banda larga sem fio definido no 3GPP, versão 7, evoluindo do WCDMA. Ele fornece extensões às definições HSPA existentes e, portanto, é compatível com versões anteriores, até a versão original 99 da versão WCDMA. O HSPA evoluído teoricamente fornece taxas de dados de até 168 Mbps no *downlink* e 22 Mbps de *uplink*. Este padrão, utiliza uma técnica de múltiplas entradas e múltiplas saídas (2x2 MIMO), usando mais de uma antena para transmissão no mesmo canal, com portadoras de 5 MHz e ainda modulação de ordem superior em quadratura 64 QAM para *download* e 16 QAM para *upload*, favorecendo taxas de transferências maiores. Ocorre um menor tempo para o estabelecimento de chamadas, capacidade para uso de voz ampliada e possui suporte à aplicações que exigem grandes quantidades de informações [23] e [27].

2.1.4 Tecnologia 4G

A quarta geração de redes móveis (4G), já implantada na maioria dos países, vem evoluindo e popularizando cada vez mais. O primeiro país que iniciou a comercialização dessa tecnologia foi a Coreia do Sul em 2005, e no Brasil as primeiras instalações desta tecnologia foram em 2013, com uma impulsão de ter o 4G nas capitais que sedariam a Copa do Mundo de 2014 [9].

Nesta geração há uma alta velocidade de tráfego de rede, superando a da rede 3G, e foram projetadas para usar protocolo IP como base de toda comunicação. Os padrões iniciais nesta geração, chamado de “pré 4G”, foram o HSPA+, HTC Evo 4G, LTE e o *Mobile WiMAX*, estes, não se enquadravam nas exigências emitidas pela ITU, mesmo assim, os vendedores foram autorizados a anunciar os sistemas como 4G. De acordo com as normas da ITU, foram lançados os padrões *LTE Advanced* e o *Mobile WiMAX Advanced*, conhecido como o “4G verdadeiro”. As bandas usadas para o 4G no Brasil são a B28 de 700 MHz, a B3 de 1800 MHz e a B7 de 2600 MHz. A B 28 tem um menor alcance, mas tem uma melhor cobertura em ambientes internos, já a B7 essa situação se inverte [8] e [39].

O padrão LTE, que é o adotado atualmente no Brasil, padronizado pela 3GPP, vem com a ideia de melhorar o desempenho, reduzindo o custo por bit, possibilitando variedades de serviços móveis. Pode-se chegar em taxas de até 300 Mbps em *downlink*, utilizando técnica MIMO 8X8 e 75 Mbps em *uplink*, utilizando técnica MIMO 4X4. Utiliza-se o padrão OFDMA, onde vários usuários compartilham a banda ao mesmo tempo, combinado com o SC-FDMA, onde melhora o desempenho das taxas de *uplink*, bem como, reduz custos de amplificadores usados no projeto. Neste padrão, ocorre a combinação de comutação de circuitos e pacotes, permitindo transições de redes, e ainda há uma tecnologia de automação, chamada de *Self Organizing Network* (SON), tornando mais simples o planejamento, as configurações, e o gerenciamento das redes, permitindo a configuração e sincronização com redes adjacentes. Seu espectro é considerado flexível, dando suporte à agregação espectral e largura de banda escalável, com isso, diminuem interferências entre células, sendo possível aumentar o número de usuários por célula, na rede. O chamado núcleo do LTE é baseado no protocolo TCP/IP, sendo assim, a voz é servida por meio de comutação de pacotes, com o serviço Volp (*Voice Over Internet Protocol*). Possui latência de 10ms [28] e [29].

LTE Advanced é um padrão criado para cumprir completamente os requisitos do 4G, estabelecidos pela ITU. Utiliza-se um espectro de frequência de até 100 MHz, possuindo então, largura de banda requisitada pelo ITU, maior que 70MHz para *downlink*, oferecendo taxas 1 gigabit e 40 MHz para *uplink*, oferecendo taxas de 500 megabits, usando MIMO. Em comparação com o LTE, consegue-se uma taxa de transferência média, para o usuário, três vezes maior, usando a técnica MIMO, oferecendo maior confiabilidade e capacidade, com seu espectro sendo flexível. Ocorre um aumento do número de assinantes simultaneamente ativos, agregação de portadoras (CA), o uso aprimorado de técnicas de antenas múltiplas e suporte para Nódulos de retransmissão (RN). A cobertura é otimizada, sendo compatível com padrões anteriores e é totalmente baseada no protocolo TCP/IP [30], [31] e [32].

2.1.5 Tecnologia 5G

A quinta geração redes móveis (5G), ainda em fase de estudos e testes laboratoriais, deverá entregar os serviços de telefonia com uma maior e melhor cobertura, consequentemente uma melhor qualidade do sinal, do que as gerações anteriores, trazendo um novo cenário para a população e para economia. Essa geração foi impulsionada devido as redes atuais não suportarem o grande tráfego de rede esperado e serviços que estão por vir. Como isso vem surgindo e se alastrando de maneira muito rápida, de acordo com a ITU o 5G deverá ter um padrão comercializável até o final de 2020, identificando esta nova geração como IMT-2020 e que será padronizada pelo 3GPP [33].

No dia 15 de fevereiro de 2017, representantes do governo federal, centros de desenvolvimento tecnológicos, prestadoras de serviços de telecomunicações e academias, formalizaram o Projeto 5G Brasil. Esse projeto conta com a participação do MCTIC, ANATEL, Telebrasil, Abinee, Cetuc, CPqD, Fitec, Inatel, SindiTelebrasil, Tim, Ericsson, Huawei, Nokia, Oi, Trópico e Qualcomm. Este projeto possui o intuito de participar de discussões internacionais para definições de critérios para a nova geração, e fomentar a sua implantação. Há diferentes grupos de pesquisa internacionalmente, como por exemplo o METIS (Mobile and wireless communications Enabler for the Twenty Information Society) e outros grupos financiados pelo FP7, o 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) o 4G e 5G Américas, o 5GMF (The Fifth Generation Mobile Communication Promotion Group), etc [33] e [34].

Há alguns requisitos que deverão ser levados em conta, como por exemplo, a largura de banda por unidade de área aumentará em até 1000 vezes, e o número de usuários crescerá cerca 10 até 100 vezes. Há requisitos bem definidos também para serem cumpridos, não ficando somente a cargo desta geração, sendo esta uma contribuinte para conseguirmos atender metas propostas, por exemplo, em cada célula a taxa teórica de *downlink* máxima é 20Gbps e de *uplink* de 10Gbps, esperando que chegue ao usuário cerca de até 1Gbps para *downlink*; a rede deverá estar disponível em 99,99%; a cobertura geográfica deverá ser 100%, inclusive área remotas; possuir latência menores que 1ms até o máximo de 4ms, dando suporte à comunicação em tempo real e controle remoto de objetos; dar suporte de rede tanto para um usuário parado ou em movimento de até 500 km/h, em zona rural; alta eficiência energética, com redução no uso de energia de rede de 90%; alta vazão

permitindo boa conexão em áreas urbanas densas, ambientes fechados, multidões em eventos; e aumento da vida útil da bateria em cerca de 10 vezes para dispositivos com baixo consumo, sendo que a energia por bit deverá ser reduzida em mais de 1000 vezes. Como vimos há vários requisitos impostos, e o 5G vem para atender estes propósitos, pois estes não podem ser adquirido por uma simples atualização dos sistemas atuais, e sim exigirá novos protocolos e tecnologias de acesso, equipamentos, etc [33], [35] e [36].

Com a chegada da 5G, tonará possível introduzir e dar sequência à amplas aplicações inovadoras, com possíveis cenários de caso de uso. Será possível viabilizar a Internet das Coisas (IoT), passando a conectar dispositivos eletrônicos que fazem parte do nosso dia a dia. Como por exemplo esses dispositivos podem incorporar sensores de medir pressão, temperatura ou estresse e incluir atuadores para ligar e desligar dispositivos ou fazer ajustes em tempo real. Um exemplo, são os semáforos que não seriam apenas cronometrados, mas também conectados e controlados remotamente para que os locais de congestionamento de tráfego sejam imediatamente conhecidos, e liberados. Edifícios, pontes e estradas poderão ser monitorados de forma contínua, corporações e governos poderiam passar a monitorar a poluição do ar, de forma também contínua, conseguindo regular emissões e aplicar ações corretivas. Monitoramentos, na área da saúde, podem monitorar sinais vitais do paciente para melhor compreender uma causa e efeitos de medicamentos. Há os *Wearables*, ou tecnologias vestíveis, que serão impulsionadas com a chegada do 5G, como exemplo de *Wearables*, temos calças, camisas, relógios, óculos, todos conectados, interagindo com o usuário, enviando e recebendo dados do ambiente, obtendo informações da nossa saúde. Enfim, as possibilidades são infinitas. Será, também viabilizado ainda mais também o conceito de Internet Tátil que permitirá uma interação entre sentidos humanos e máquinas, a partir do tato, sendo possível a integração do corpo humano à robótica e a realidade virtual, isso tudo devido a uma operação de latência muito baixa, esperado 1ms em comunicações ultra confiáveis, como uma das aplicações a telemedicina que poderá permitir a realização de operações complexas remotamente, com o paciente e o médico localizados em diferentes partes do mundo. Um conceito que ganhará, ainda mais, força será o do Machine to machine (M2M), o qual refere-se à comunicação direta entre dispositivos, usando qualquer canal de comunicação, sem fio ou com fio, integrando conectividade por meio de subsistema multimídia de IP (IMS), com maior taxa de transferência.

Viabilizará o uso de carros autônomos e conectados, com isso, os veículos estarão conectados com o sistema de gestão do tráfego, recebendo informações praticamente em tempo real, tornando assim a condução mais segura e condução autônoma, pois estarão em estradas, com uma completa cobertura [33], [35], [36] e [37].

São considerados os pilares da 5G:

- Evolução das Tecnologias de Rádio: as tecnologias de acesso de rádio já existentes em sistemas como GSM, HSPA+, LTE, deverão continuar evoluindo, pois possuem grandes chances de haver várias em funcionamento, uma complementando a outra, proporcionando um desempenho superior do sistema [36].
- Implantação de pequenas células, em redes hiper densas: na maioria dos casos, as operadoras não densificarão suas redes inteiras de forma uniforme, mas irão escolher locais de maiores benefícios, onde os níveis de tráfego e as exigências de qualidade do sinal são altas, melhorando significativamente a eficiência espectral da área. Essa implantação é chamada de *Hetnet* e existem duas formas de serem realizadas: sobreposição de pequenas células de uma mesma tecnologia, ou sobreposição de pequenas células com tecnologias diferentes. De acordo com a Qualcomm, a capacidade da rede duplica, sempre quando duplica o número de células pequenas, mas sempre quando reduzem o tamanho da célula aumenta a interferência entre elas, necessitando-se de técnicas de gerenciamento de interferências entre células [36].
- Redes auto organizadoras: as configurações e otimizações manuais de redes ficaram no passado, então, a automação do gerenciamento de redes deverá ser aumentada, pequenas células precisam ser autoconfiguráveis e precisam ter capacidade de se auto-organizar para se adaptarem inteligentemente às células vizinhas. Uma célula pequena pode fazer isso sincronizando de forma autônoma com a rede, ajustando-se habilmente sua cobertura de rádio. Isto é feito, por meio de conjuntos de algoritmos que podem eficientemente configurar e controlar parâmetros selecionados de uma rede móvel [36].
- Utilização de ondas milimétricas (*mmWaves*): como a maioria dos estudos de frequências de operação do 5G está na casa dos GHz (3 – 300 GHz), passa se a utilizar *mmWaves*. Com isso consegue-se aumentar a capacidade de tráfego e

com maiores taxas em cenários extremamente densos. Algumas de suas vantagens é a grande quantidade de espectro disponível, e o uso de antenas pequenas. A Samsung, testou e conseguiu atingir uma taxa de dados de 2 Gbps, com uma faixa de 1 km, em um ambiente urbano. Alguns fatores atrapalham a implantação das mmWaves, a perda é relativamente maior nessas faixas, em comparação com as bandas convencionais, as ondas eletromagnéticas tendem a se propagar na direção *Line Of Sight* (LOS), tornando links de rádio vulneráveis a serem bloqueados pela movimentação de objetos ou pessoas, há maior dificuldade de penetração em lugares internos, como casas, edifícios [36].

- **Eficiência Energética:** deve-se então desenvolver sistemas energeticamente eficientes, como por exemplo colher energia ambientais, como solar, eólica, entre outras, para implantação em rádios bases. Também deverá desenvolver técnicas de transferência de potência, aplicações do SWIPT, Cloud RAN, MIMO Massivo, consumo de energia adaptado às condições de tráfego, sistemas de antenas distribuídas. Deverá ocorrer um baixo consumo tanto para rede, quanto para os dispositivos móveis, por exemplo incluindo aumento na duração das baterias celulares [36].
- **Alocação e compartilhamento de espectro:** Será utilizada agregação de portadoras que permitirá a alocação dinâmica das frequências, ainda em definição de quais faixas serão usadas, temos as faixas de 2,5 GHz; 3,5 GHz; 28 GHz, 37 GHz e 39 GHz; 64 - 71 GHz (não licenciada) e 70/80 GHz. O propósito é otimizar frequências abaixo de 6MHz e passar a utilizar aquelas superiores a 6MHz. Como percebe-se iremos operar em frequências altas, sendo assim, o alcance das ondas diminui, diminuindo as células, o que requer mexer na atual topologia de rede. Há vários estudos, para o uso de rádio cognitivo na alocação de espectro, bem como estudos para o uso de espectro não licenciados, e compartilhamento daqueles licenciados com os que não são, possuindo um sistema mais flexível [36] e [38].
- **Virtualização RAN (Radio Access Network):** permite o compartilhamento de infraestrutura sem fio entre vários operadores, trazendo inúmeras vantagens para o domínio sem fio, incluindo as despesas de aquisição de bens de CAPEX e os custos operacionais de OPEX, por meio de compartilhamento de redes e equipamentos, manutenção fácil e rápida solução de problemas por meio de maior

transparência da rede, bem como aumento da eficiência. É uma ótima alternativa, para quando se tem uma grande quantidade de tráfego de dados móveis [36].

2.2 Parâmetros de Desempenho e Qualidade de Sinal Recebido

Nesta seção, será introduzido e explicado os principais parâmetros de um sinal recebido vindo de uma estação rádio base.

2.2.1 Indicadores de desempenho do sinal

Os dados de propagação são de extrema importância, no planejamento de uma rede. Nas redes móveis, para garantir a qualidade de recepção do sinal em cada ponto de uma área de cobertura é fundamental o conhecimento das características de propagação no canal. A qualidade e o nível de sinal estão sujeitos a interferências geográficas e meteorológicas, dependendo principalmente da posição onde a pessoa se encontra em relação à antena da operadora que está mais próxima. Vale ressaltar que o equipamento do usuário e as estações base, chamada no 4G de eNodeB, estão constantemente realizando medições nas redes, visando melhorar a cobertura [40].

A qualidade de serviço de uma rede é medida por meio de alguns indicadores de desempenho e está diretamente ligado ao nível de sinal recebido. Com a análise dos dados, é possível verificar se o sinal recebido está de acordo com o esperado, sendo essencial, para um projeto de cobertura da área, visando uma melhor qualidade de serviço e um maior atendimento de usuários. Se temos um baixo desempenho, temos uma rede propícia à falhas de conexão. Os indicadores mais importantes são [41]:

RSRP - Potência Reportada do Sinal Recebido (*Received Signal Reported Power*) (dBm)

RSRQ - Qualidade Reportada do Sinal Recebido (*Received Signal Reported Quality*) (dB)

RSSI - Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication*) (dBm)

RSSNR (SINR) - Relação Sinal Ruído do Sinal Recebido (*Received Signal Signal Noise Ratio*) (dB)

A unidade de medida dos indicadores de potência e intensidade é o dBm, uma unidade de medida logarítmica utilizada nas comunicações, para indicar potência, ela indica decibéis (dB) relativos a um miliwatt (mW) [41].

O RSRP é a potência média linear do sinal, em toda a largura de banda do canal e seus valores variam de -44 dBm e -140 dBm com 1 dB de resolução [42]. A partir desse parâmetro é possível determinar qual a melhor célula da interface de rádio, para ser utilizada. Como regra geral, para uma célula no ambiente externo, os resultados da medição RSRP no 4G podem ser classificados em três faixas. Se $\text{RSRP} > -75$ dBm pode se esperar um excelente sinal, desde que não haja muitos assinantes e largura de banda disponível da célula. No intervalo entre -75 e -95 dBm, temos um QoS (Quality of Service) aceitável, com uma leve degradação, por exemplo, a taxa de transferência diminuirá de 30 a 50%, se o RSRP diminuir de -75 a -95 dBm. Abaixo de -95 dBm, a QoS se torna inaceitável e o rendimento tende a diminuir até zero, em aproximadamente -108 a -100 dBm [40], [42] e [43].

O RSSI é o parâmetro que mede a energia média total do sinal recebida, observando apenas símbolos OFDM, em outras palavras a intensidade recebida do sinal, ou seja, sua força, e é expresso em dBm, sempre tem um valor negativo, e quanto maior esse valor, ou seja, mais perto de zero, maior a intensidade. Temos uma excelente intensidade, se RSSI maior que -73 dBm, na faixa de -75 dBm a -85 dBm uma boa intensidade e a baixo de -87 dBm uma intensidade ruim [40], [42] e [43].

O RSRQ mede a qualidade do sinal, também é usado, para escolha de uma melhor célula, que esteja com uma melhor qualidade. É diretamente ligado ao *handover* e usado principalmente, quando os outros parâmetros não são suficientes para fazer uma decisão confiável, então quando o equipamento do usuário estiver com um sinal baixo, é possível decidir qual célula tem uma melhor qualidade. Esse parâmetro no 4G está no intervalo de -19.5 e -3 dB, com uma resolução de 0.5 dB. É esperado em geral que valores de RSRQ superiores a -9 dB possuem os melhores cenários para QoS, garantindo uma melhor experiência para o usuário. O intervalo entre -9 e -12 dB é considerado como neutro, com uma leve degradação da QoS, mas a experiência do cliente ainda está estável. Valores de RSRQ -13 dB e inferiores, o sinal fica comprometido e corre um alto risco de queda de chamadas, ficando sujeito a acontecer o *handover* [40], [42] e [43].

Por meio de um protocolo de rastreamento, utilizando uma correlação no tempo é possível determinar se o sinal está sofrendo interferência ou um problema de cobertura. Se no mesmo instante e na mesma coordenada geográfica, medirmos o sinal por meio de algum equipamento e o RSRP estiver constante ou melhorar, enquanto o RSRQ degradar, o sinal estará sofrendo com ruídos e interferência, mas se os dois degradarem ao mesmo tempo, o sinal estará sofrendo uma falta de cobertura, sendo assim possível analisar a qualidade da célula e a cobertura [40], [42] e [43].

O parâmetro RSSNR, termo que usa-se no 4G, e conhecido como SINR (*Signal To Interference and Noise Ratio*) é muito utilizado em drive testes e consegue comparar a intensidade do sinal com o ruído e interferência de outras células e nos retornar um valor, quantificando a relação entre as condições de RF e taxa de transferência do sinal. Então, normalmente, a energia de um sinal diminui com a distância da base chamada de eNodeB no 4G, o que é chamado de perda de caminho nas redes sem fio. Esse parâmetro é importante, pois com a ajuda dele a estação rádio base, seleciona o código de modulação e codificação mais adequado. Para que haja um ótimo SINR, é preciso haver mais de 21 dB; na faixa de 13 dB a 20 dB haverá um SINR bom; e no intervalo de 0 dB a 12 dB enquadra-se o pior dos cenários [40], [42] e [43].

2.3 Predição de propagação do Sinal

Nesta seção, será estudado alguns modelos de predição do sinal, dentre eles: Lee, Okumura e Hata.

2.3.1 Introdução

A predição de uma área de cobertura é de extrema importância, no planejamento de uma rede celular e posteriormente para verificações de potência recebida. Há uma variedade de modelos propostos ao longo dos anos, e sempre vão surgindo novos modelos, cabendo as pessoas verificarem qual o modelo mais adequado para cada região. Os modelos necessitam de parâmetros empíricos ou

semiempíricos para serem aplicados, podendo diferenciar na sua aplicabilidade para que a predição seja a mais realista possível.

Uma característica muito importante, na definição dos modelos, é a classificação de cada área com relação a urbanização. Existe a área aberta ou rural que é um espaço aberto onde não há obstáculos, como árvores grandes ou prédios no trajeto da propagação. Existe a área suburbana que é uma região com árvores e casas, ou seja, uma região que apresenta alguns obstáculos próximos ao receptor, mas não tão congestionado. Existe também a área urbana que é uma cidade com grande concentração de prédios e árvores grandes e altas.

2.3.2 Modelo de propagação de Lee

O Modelo de Lee é um modelo empírico, chamado também de estocástico, bastante utilizado no estudo de predições e planejamento do sinal, em redes móveis, devido sua precisão acerca da cobertura de sinais. Este modelo foi criado em 1985 por W. C. Y. Lee, baseado em dados experimentais, em diversas áreas com características diferentes e é válido até hoje, para redes com uma frequência em torno de 900MHz, e em regiões, relativamente planas. Em regiões montanhosas os valores podem sofrerem desvios entre valores teóricos e medidos [44], [45] e [46].

Neste modelo não necessariamente, precisamos saber grandes detalhes de questões morfológicas da região e particularidades da topografia, apenas o tipo de terreno, e alguns elementos. Devido aos experimentos realizados por Lee, há um conjunto de parâmetros já definidos para condições padrões de determinada área, que são suficientes, para determinar o comportamento de propagação do sinal. Lee trabalhou com o conceito de manchas morfológicas, encontrando diferentes parâmetros de ajustes, para áreas urbanas e suburbana, vegetação densa, média ou rasteira e meio aquático. Não é necessário saber informações sobre altura de prédios e suas disposições na área [44], [45] e [46].

Devido aos vários experimentos realizados, o modelo pode ser expresso pela equação 2.1:

$$P_r = P_0 - \gamma \log \left(\frac{r}{r_0} \right) + Af + G_{effh}(h_e, h_1) + \alpha + L \quad (2.1)$$

Onde temos que,

P_r = Potência de recepção [dBm];

P_0 = Potência de recepção no ponto de interseção [dBm];

γ = Decaimento da atenuação de propagação ou fator de rugosidade do terreno [dB/década];

r = Distância entre a estação base e o móvel [km];

r_0 = Distância entre a estação base e o ponto de interseção [km];

G_{effh} = Ganho devido à altura efetiva [dB];

h_e = Altura efetiva da antena da estação base [m]

h_1 = Altura real da antena da estação base [m];

L = Perdas por difração no terreno – perdas por sombreamento [dB];

Af = Fator de ajuste da frequência [dB];

α = Fator de ajuste do sinal.

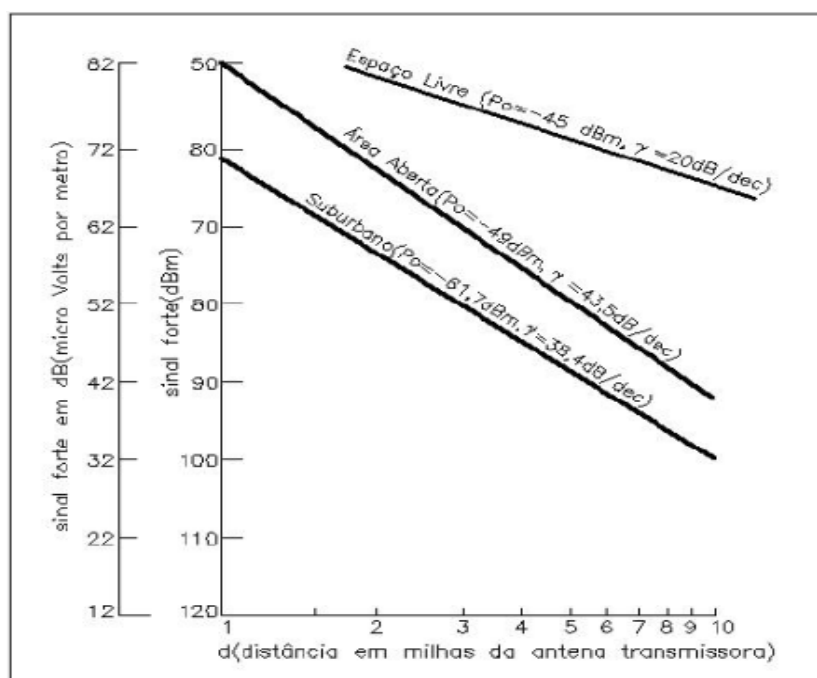
O termo $P_r = P_0 - \gamma \log\left(\frac{r}{r_0}\right)$ é designado como sendo a atenuação de propagação área à área, ele é baseado no fator de rugosidade do terreno e da potência de recepção, no ponto de interseção de uma milha (1,60934 km). Quando não houver os valores medidos dos fatores, pode-se basear em medidas reais de outras regiões para calcular a atenuação. De acordo com as medidas da Figura 2.2, conseguimos montar a Tabela 2.1 diferenciando cada ambiente [44], [45] e [46].

Tabela 2.1 – Decaimento e ponto de interseção derivados de medidas reais.

AMBIENTE	P_0 (dBm)	γ (dB/década)
Espaço Livre	-45,0	20,0
Área Aberta	-49,0	43,5
Suburbano	-61,7	38,4

Fonte: de acordo com [46].

Figura 2.2 - Decaimento e ponto de interseção derivados de medidas reais.



Fonte: de acordo com [46].

Para determinar o termo de ajuste da frequência (Af), deve-se verificar em qual caso se enquadra o ambiente e a faixa de frequência utilizada, para que se use a fórmula correta. A fórmula já traz a frequência de referência, que é 850 MHz, e deve-se saber a frequência da portadora em MHz para calcular Af em dB. Segue na Tabela 2.2 as fórmulas para o ajuste [44], [45] e [46].

Tabela 2.2 – Fator de ajuste de frequência Af .

BANDA DA FREQUENCIA	AMBIENTES URBANOS	AMBIENTES RESTANTES
150 a 450 MHZ	$Af = 8,29 - 20\log\left(\frac{f}{850}\right)$	$Af = - 20\log\left(\frac{f}{850}\right)$
450 a 850 MHZ	$Af = - 30\log\left(\frac{f}{850}\right)$	$Af = - 20\log\left(\frac{f}{850}\right)$
850 a 2400 MHZ	$Af = - 30\log\left(\frac{f}{850}\right)$	$Af = - 30\log\left(\frac{f}{850}\right)$

Fonte: de acordo com [46].

Outro parâmetro importante é o ganho associado à altura efetiva da antena (G_{effh}). Quando não há uma obstrução entre o raio de propagação da estação base

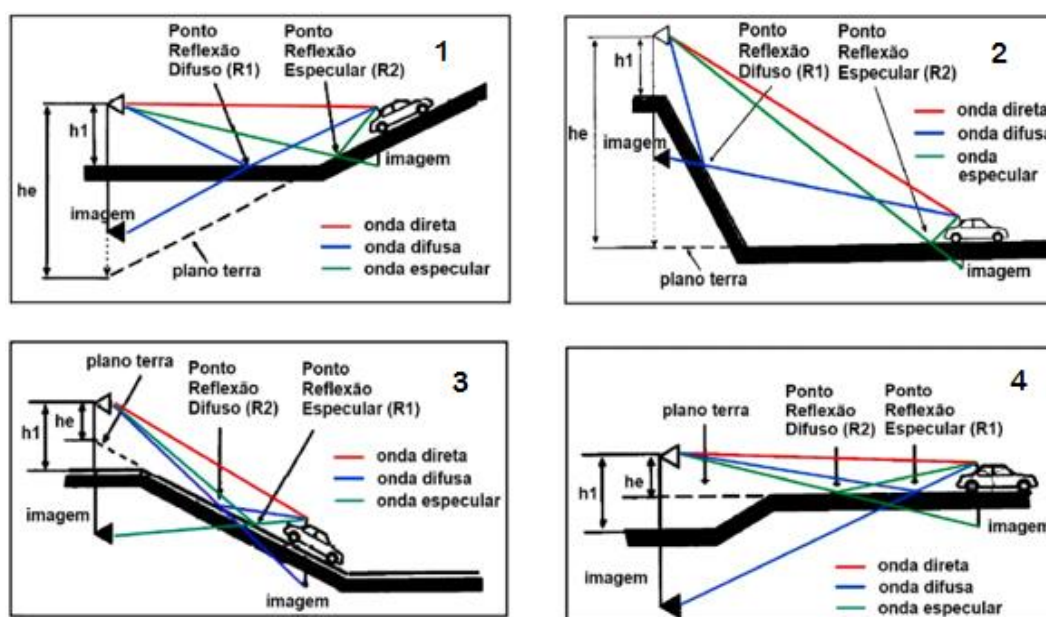
com o móvel, o sinal recebido é uma junção da onda direta com ondas refletidas no terreno. A altura efetiva da antena (h_e) é a distância entre o centro de emissão da antena e a intersecção do plano terra, ou seja, é a altura do centro de radiação desta mesma antena até o solo, somada ao nível médio do terreno e é usada para calcular o ganho [44], [45] e [46].

Devemos, primeiramente, observar qual perfil de terreno o sinal percorre e determinar o ponto de reflexão mais perto do móvel, usando o método das imagens. Para realizar essa análise existem alguns parâmetros fundamentais que são a altura do sistema de antenas da estação base (h_1), a altura da antena do móvel (h_2) e a distância do móvel a estação base (d), como podemos observar na Figuras 2.3. Por meio da Figura 2.3 pode-se perceber que existe o Ponto de Reflexão Difuso (R_1), que é a intersecção do solo quando fazemos a visada da onda entre a imagem da antena base até o móvel e o Ponto de Reflexão Especular (R_2) que é a intersecção do solo quando fazemos a visada da onda entre a imagem do móvel até a antena da base [44], [45] e [46].

O ganho efetivo é dado pela equação 2.2:

$$G_{effh} = 20 \log \left(\frac{h_e}{h_1} \right) \quad (2.2)$$

Figura 2.3 – Exemplos de modelos para determinar altura efetiva da antena.



Fonte: de acordo com [46].

O termo de ajuste (α), ajusta a previsão da cobertura por meio de alguns parâmetros baseados em reais medições, corrigindo altura, potência e ganho da estação base e móvel. O termo é expresso pela seguinte equação 2.3 [44], [45] e [46].

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_{tp}} \right) + 20 \log \left(\frac{h_1}{h_{1p}} \right) + 10 \log \left(\frac{h_2}{h_{2p}} \right) + (Gr - Grp) + (Gm - Gmp) \quad (2.3)$$

Onde,

P_t = Potência de emissão da estação - base [W];

P_{tp} = Potência de emissão padrão da estação - base [W];

h_1 = Altura da antena da estação base [m];

h_{1p} = Altura padrão da antena da estação base [m];

h_2 = Altura da antena do móvel [m];

h_{2p} = Altura da antena padrão do móvel [m];

Gr = Ganho da antena da estação - base [dBd];

Grp = Ganho padrão da antena da estação base [dBd];

Gm = Ganho da antena do móvel [dBd];

Gmp = Ganho padrão da antena do móvel [dBd].

Os valores padrão para o modelo de Lee são:

$P_{tp} = 10 \text{ W};$

$h_{1p} = 30 \text{ m};$

$h_{2p} = 3 \text{ m};$

$Grp = 6 \text{ dBd};$

$Gmp = 0 \text{ dBd}.$

Outro termo importante é a perda por difração no terreno, este termo deve ser calculado, quando não possui uma visada direta entre a estação móvel e base, ou seja, há obstrução na área a ser analisada. Essa obstrução pode ser tanto parcial

quanto total. Esse termo é chamado também de perda por sombreamento, e pode variar consideravelmente, conforme a posição entre as estações, podendo ocorrer desvio de potência e perdas por difração. Baseado na teoria da difração de Fresnel-Kirchoff, para calcular a perda, precisa-se descobrir o valor do parâmetro adimensional determinado pela letra v e em seguida fazer uma análise em qual cenário, o parâmetro se encaixa. Temos a equação 2.4 para o parâmetro v : [44], [45] e [46].

$$v = -hp \sqrt{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \left(\frac{2}{\lambda}\right)} \quad (2.4)$$

Onde,

hp = altura da obstrução acima ou abaixo do raio direto (m);

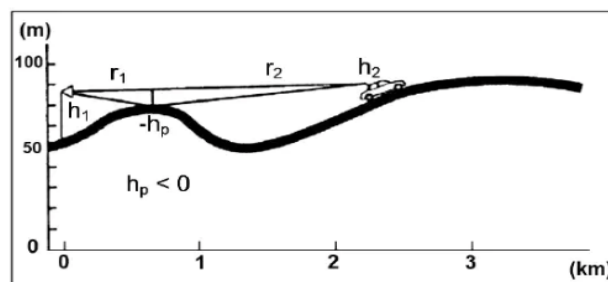
λ = comprimento de onda (m);

r_1 = distância da estação - base ao obstáculo em lâmina (m);

r_2 = distância do obstáculo em lâmina ao móvel (m).

Temos o cenário com a visada direta entre base e móvel, representado pela Figura 2.4.

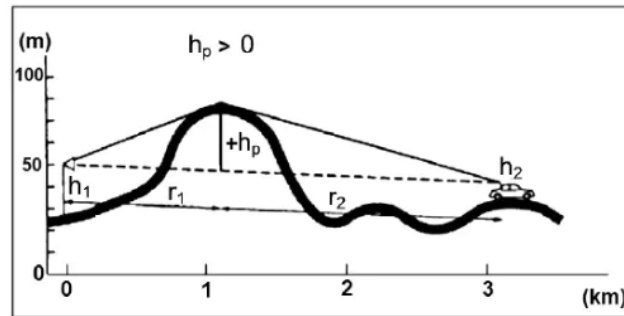
Figura 2.4 – Visada direta entre Base e Móvel.



Fonte: de acordo com [46].

Temos outro cenário, onde não temos uma visada direta entre base e móvel, representado pela Figura 2.5.

Figura 2.5 – Visada indireta entre Base e Móvel.



Fonte: de acordo com [46].

As seguintes funções aproximam o valor da perda [44], [45] e [46]:

$$L = 0; 1 < \nu \quad (2.5)$$

$$L = -20 \log (0,5 + 0,62 \nu); 0 < \nu < 1 \quad (2.6)$$

$$L = -20 \log (0,5e^{0,92\nu}); -1 < \nu < 0 \quad (2.7)$$

$$L = -20 \log (0,4 - \sqrt{-0,1184 - (0,1\nu + 0,38)^2}); -2,4 < \nu < -1 \quad (2.8)$$

$$L = -20 \log \left(-\frac{0,225}{\nu} \right); \nu < -2,4 \quad (2.9)$$

2.3.3 Modelo de propagação de Okumura

O modelo de Yoshihisa Okumura proposto, em 1968, foi resultado de medições realizadas em Tóquio, não possuindo explicação analítica é um modelo empírico *outdoor*. É um modelo bem confiável em ambientes aglutinados, suburbanos e urbanos, não sendo muito bom, em áreas rurais. Este modelo muitas das vezes é de difícil implementação devido utilizar gráficos na análise. Esse modelo é mais adequado, quando atende a alguns parâmetros específicos, dentre eles uma frequência da antena transmissora entre 150 MHz e 1920 MHz, altura da antena transmissora entre 30 metros e 1000 metros e por último uma distância entre a estação base e o móvel de 1Km a 100 Km. A potência de recepção é dada pela equação 2.10: [8] e [47] e [48].

$$Pr(dBm) = Pt + Gt + Gr - L(dB) + 30 \quad (2.10)$$

Onde,

Pr = Potência de recepção [dBm];

Pt = Potência de emissão da estação - base [dBW];

Gt = Ganho da antena da estação - base [dBi];

Gr = Ganho da antena do móvel [dBi];

L = valor médio da perda devido ao caminho de propagação [dB].

Alguns fatores de correção são usados para calcular o valor médio da perda devido ao caminho de propagação como se vê na equação 2.11. Os parâmetros para região urbana que foram realizadas as medições, a altura efetiva da estação base era de 200 metros e a altura do móvel de 3m, então, quando a região analisada não coincide com esses valores, é necessário o ajuste [8] e [47].

$$L = |A_0| + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G(area) \quad (2.11)$$

Onde,

A_0 = perda de propagação no espaço livre [dB];

$A_{mu}(f, d)$ = valor em [dB] encontrado em curvas empíricas;

$G(h_{te})$ = fator de ganho da estação transmissora [dB];

h_{te} = altura efetiva da antena transmissora [m];

h_{re} = altura efetiva da antena receptora [m];

$G(h_{re})$ = fator de ganho da estação receptora [dB];

$G(area)$ = ganho gerado devido ao ambiente de estudo [dB].

A perda de propagação no espaço livre, é determinada pela equação 2.12 e depende da frequência de emissão da antena base e da distância da antena base com o móvel.

$$A_0 = 10 \log \left(\frac{\left(\frac{c}{f} \right)^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (2.12)$$

Onde,

c = velocidade da luz no vácuo $\cong 300.000 \text{ km/s} = 300.000.000 \text{ m/s}$;

f_c = frequência da portadora [MHz];

d = distância da estação base até o móvel [m].

Os fatores de correção $G(h_{te})$ da antenna transmissora é dado pela equação 2.13 e o fator de correção do receptor $G(h_{re})$ é dado pelas equações 2.14 e 2.15, onde a altura é determinante pela escolha da equação [8] e [47].

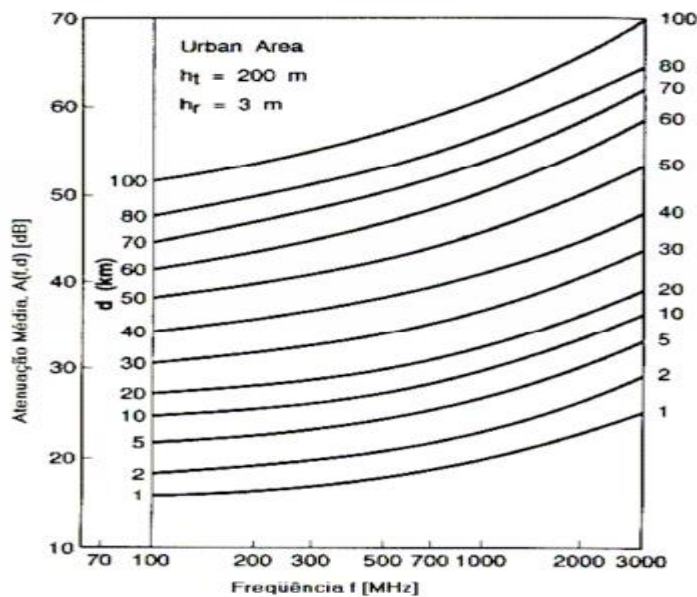
$$G(h_{te}) = 20 \log \left(\frac{h_{te}}{200} \right) \quad 100 \text{ m} > h_{te} > 30 \text{ m} \quad (2.13)$$

$$G(h_{re}) = 10 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) \quad h_{re} \leq 3 \text{ m} \quad (2.14)$$

$$G(h_{re}) = 20 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) \quad 10 \text{ m} > h_{re} > 3 \text{ m} \quad (2.15)$$

Após várias medidas, em áreas urbanas, com terreno quase plano, foi desenvolvido um conjunto de curvas que retrata a atenuação média em relação ao espaço livre, as curvas foram expostas por meio de medições, como pode-se perceber com base na Figura 2.6 as medidas foram realizadas a uma altura efetiva da estação base de 200 metros e a altura do móvel de 3m. Quando as antenas da região não condizem com o experimento é só aplicar o termo de ajuste a partir do valor médio da perda devido ao caminho de propagação (L) [8] e [47].

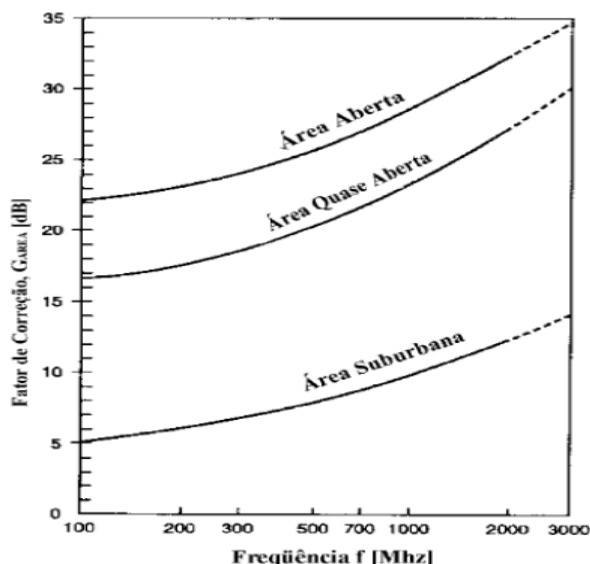
Figura 2.6 - Curva de atenuação média relativa ao espaço livre.



Fonte: de acordo com [8].

Na Figura 2.7 podemos verificar o ganho de potência devido ao ambiente, esse valor é expresso em dB para diferentes tipos de frequência e é encontrado em curvas empíricas.

Figura 2.7 - Fator de correção para diferentes tipos de terreno.



Fonte: de acordo com [8].

2.3.4 Modelo de propagação de Hata

O Modelo de Masaharu Hata, proposto em 1980, é considerado como sendo uma extensão do modelo de Okumura. Hata encontrou as equações que compõem um dos modelos mais usados para previsão do sinal, sendo considerado também um modelo empírico *outdoor*. Este modelo é bastante utilizado devido a sua simplicidade, podendo ser implementado em simulações computacionais, ao comparar as curvas de Okumura com Hata temos diferença de poucos dB. Este modelo é mais recomendado, quando atende a alguns parâmetros específicos, dentre eles uma frequência da antena transmissora entre 150 MHz e 1500 MHz, a altura da antena transmissora entre 30 metros e 200 metros e por último uma distância entre a estação base e o móvel de 1Km a 20 Km. É um modelo mais limitado do que o de Okumura, encurtando os intervalos desejáveis [8] e [48].

$$Pr = Pt + Gt + Gr - L(dB) + 30 \quad (2.16)$$

Onde,

Pr = Potência de recepção [dBm];

P_t = Potência de emissão da estação - base [dBW];

G_t = Ganho da antena da estação - base [dBi];

G_r = Ganho da antena do móvel [dB];

L = Valor médio da perda devido ao caminho de propagação [dB].

A perda de propagação, no caminho, varia de acordo com a região analisada, sendo o cálculo diferente para regiões urbanas, regiões suburbanas e áreas rurais abertas. Podemos calcular a perda com as equações 2.17, 2.18 e 2.19.

$$L_{urbano} = 69,55 + 26,16 \log fc - 13,82 \log hte - a(hre) + (44,9 - 6,55 \log hte) \log d \quad (2.17)$$

$$L_{suburbano} = L_{urbano} - 2 \left[\log \left(\frac{fc}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (2.18)$$

$$L_{\text{área aberta}} = L_{urbano} - 4,78 (\log fc)^2 + 18,33 \log fc - 40,94 \quad (2.19)$$

Onde,

L = Valor médio da perda devido ao caminho de propagação [dB];

fc = frequência da portadora [MHz];

hte = altura efetiva da antena transmissora [m];

hre = altura efetiva da antena receptora [m];

d = Distância entre a estação rádio base receptora [km];

$a(hre)$ = fator de correção da altura efetiva da antena receptora da unidade móvel

Para uma cidade de pequeno ou médio porte, o fator de correção da antena é dado pela equação 2.18:

$$a(hre) = (1,1 \log fc - 0,7) hre - (1,56 \log fc - 0,8) \quad (2.18)$$

Para uma cidade grande a correção pode variar de acordo com a frequência e é dado pelas equações 2.19 e 2.20.

$$a(hre) = 8,29 (\log 1,54 hre)^2 - 1,1 \quad fc \leq 300 \text{ MHz} \quad (2.19)$$

$$a(hre) = 3,2 (\log 11,75 hre)^2 - 4,97 \quad fc \geq 300 \text{ MHz} \quad (2.20)$$

2.4 Legislações das Redes Móveis

Nesta seção, são introduzidas as leis de redes móveis: Regulamento SMP, o Regulamento RGQ SMP e a Fiscalização do Cumprimento de Sinais Recebidos.

2.4.1 Normatização do SMP

Em 16 de julho de 1997, foi aprovado a Lei Geral das Telecomunicações nº 9.472, criando e colocando em atividade um órgão regulador e fiscalizador dos sistemas de comunicação do Brasil. Foi então, criada a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), não sendo subordinada hierarquicamente, a nenhum órgão de governo, essa agência define as leis a serem cumpridas pelas prestadoras/operadoras de celular, regulamentando o setor de telefonia móvel. Todas operadoras precisam se adequar e se adaptar às exigências da ANATEL e aos contratos firmados com os usuários. Dentre os regulamentos, a serem seguidos estão a Resolução nº 477, de 7 de agosto de 2007, que é o Regulamento do Serviço Móvel Pessoal (SMP), e a Resolução nº 575, de 28 de outubro de 2011, que é o Regulamento de Gestão da Qualidade da Prestação do Serviço Móvel Pessoal (RGQ SMP). Outro documento, para fiscalização, emitido pela Anatel, é a Portaria nº 1718, de 07 de dezembro de 2017, que aprova o Procedimento de Fiscalização, para verificação do cumprimento dos compromissos de abrangência e da área de cobertura do Serviço Móvel Pessoal (SMP) [49], [50] e [51].

2.4.2 Regulamento SMP

Nesse Regulamento, existem deveres importantes que devem ser cumpridos. As prestadoras devem prestar serviço adequado previsto na regulamentação, usarem somente equipamentos que tenha certificação aceita ou expedida pela Anatel, bem como suas Estações Móveis, também, devem ser certificadas. As prestadoras devem informar a todos e possíveis usuários, o direito de optar e vincular ao Plano Básico de Serviço, deverão garantir que o usuário receba e envie mensagens para qualquer outra prestadora de SMP e que tenha cadastro atualizado dos usuários. Quanto ao Plano de Serviço, no contrato deverá ter cláusulas obrigatórias, com a descrição, valores de multas, sanções por má utilização, recursos que o usuário tem direito, como proceder para um atendimento se caso o usuário quiser solicitar e reclamar, como

proceder em caso de desistência do plano ou pedido de inadimplência, a prestadora deve identificar o plano, bem como seu número, todas às vezes que solicitado. Caso haja descontinuidade do serviço adquirido, a prestadora deverá oferecer reparação ao usuário, proporcional ao tempo de interrupção [49].

A prestadora deverá disponibilizar cópia do contrato de prestação do SMP, cópia do plano de serviço, informações sobre pagamentos e o código de acesso do usuário. O contrato de prestação poderá ser reincidido a qualquer momento pelo usuário, ou pela prestadora, com provas legais de descumprimento de cláusulas do contrato. É vedado qualquer prazo de carência para mudança do plano, qualquer cobrança por chamadas não completadas [49].

As metas de qualidade presentes no Regulamento de Gestão da Qualidade e na Fiscalização de Sinais recebidos devem ser cumpridas, e as prestadoras disponibilizarem recursos técnicos e humanos, para a realização dos testes de qualidade. Quanto às reclamações feitas pelos usuários na Anatel, as prestadoras terão o máximo de 5 dias para prestarem informações. Deverá estar disponível em tempo real, sem cobranças, todos os protocolos, de solicitação de serviços, atendimento, pedidos de rescisão e informação, que poderão ser acessados via internet ou por outros meios [49].

2.4.3 Regulamento RGQ SMP

Cabe as prestadoras contratarem Entidades Aferidoras de Qualidade, e divulgarem para Anatel os testes de indicadores, ficando a cargo da Anatel usar métodos alternativos para comprovação de dados fornecidos. A Anatel tem o direito de tornar público os resultados apresentados pelas prestadoras. Alguns indicadores que deverão ser realizados são: Indicadores de Reação do Usuário, Indicadores de Rede, Indicadores de Conexão de Dados e Indicadores de Atendimento [50].

A seguir, na Figura 2.8 podemos verificar uma tabela extraída do site da ANATEL, com todos os indicadores e os valores a serem seguidos.

Figura 2.8 – Indicadores do regulamento RGQ SMP.

GRUPO DO INDICADOR	MNEMÔNICO	INDICADOR	DESCRIÇÃO	META EM VIGOR	APLICABILIDADE DA META
REAÇÃO DO USUÁRIO	SMP1	Taxa de Reclamações	Reclamações recebidas na prestadora pelo total de acessos em operação	$\leq 1\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP2	Taxa de Reclamações na Anatel	Reclamações recebidas na Anatel sobre o total da prestadora	$\leq 2\%$	Área de Numeração (popular DDD)
REDE - VOZ	SMP3	Taxa de Completamento de Chamadas para o Centro de Atendimento Telefônico	Atendimento das chamadas destinadas ao Centro de Atendimento da prestadora, em cada Período de Maior Movimento	$\geq 95\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP4	Taxa de Completamento (de chamadas)	Chamadas originadas completadas do total de tentativas, em cada Período de Maior Movimento	$\geq 67\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP5	Taxa de Alocação de Canal de Tráfego	Acesso aos canais de voz do total de tentativas, em cada Período de Maior Movimento	$\geq 95\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP6	Taxa de Entrega de Mensagem de Texto	Mensagens de Texto entregues ao usuário em até 60 seg	$\geq 95\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP7	Taxa de Queda de Ligações	Quedas de ligação do total de chamadas completadas, em cada Período de Maior Movimento	$< 2\%$	Área de Numeração (popular DDD)
CONEXÃO DE DADOS	SMP8	Taxa de Conexão de Dados	Conexões estabelecidas do total de tentativas de conexão de dados, das 10h - 22h	$\geq 98\%$	Unidade Federativa
	SMP9	Taxa de Queda das Conexões de Dados	Quedas de conexões do total de conexões de dados estabelecidas, das 10h - 22h	$< 5\%$	Unidade Federativa
	SMP10	Garantia de Taxa de Transmissão Instantânea Contratada	Representa a velocidade aferida em cada medição. Deve atingir no mínimo 40% da taxa de transmissão contratada em 95% das medições realizadas, das 10h - 22h	$\geq 95\%$	Unidade Federativa
	SMP11	Garantia de Taxa de Transmissão Média Contratada	Representa a média de todas as medições realizadas na rede da prestadora. Deve atingir no mínimo o percentual descrito à direita da taxa de transmissão contratada nas medições realizadas.	$\geq 80\%$	Unidade Federativa
ATENDIMENTO	SMP12	Taxa de Atendimento pelo Atendente em Sistemas de Autoatendimento	Chamadas atendidas pelas telefonistas em até 20 seg	$\geq 90\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP13	Taxa de Resposta ao Usuário	Respostas, a solicitações de serviço ou pedidos de informação recebidos, em até 5 dias úteis	$\geq 95\%$	Área de Numeração (popular DDD)
	SMP14	Taxa de Atendimento Pessoal ao Usuário	Atendimentos presenciais realizados em até 30 min	$\geq 95\%$	Área de Numeração (popular DDD)

Fonte: de acordo com [52].

2.4.4 Fiscalização do Cumprimento de Sinais Recebidos

Alguns procedimentos e alguns fatores devem ser levados em conta para verificação do cumprimento dos compromissos de abrangência e da área de cobertura do Serviço Móvel Pessoal (SMP). Por meio de uma ferramenta de predição é feito uma análise da área de cobertura, em seguida é feita as medidas em campo, a partir de um *drive test*. Em seguida faz-se uma análise comparativa do projeto de cobertura com as medidas do *drive test*. Na ferramenta de predição é calculado o percentual da área de cobertura, utilizando o polígono georreferenciado, e deve-se verificar, se este polígono é o mesmo usado pela Agência. O *drive test* se refere a um conjunto de recursos de hardware e software usado para coletar medidas de parâmetros da rede móvel, sendo assim, é possível avaliar área de cobertura, desempenho do sistema móvel e comparar a qualidade do sinal das operadoras [51].

Alguns parâmetros devem ser considerados, todos com percentual de disponibilidade temporal de 90%, sendo que o valor percentual da área de cobertura deve ser arredondado para o inteiro mais próximo. Para a tecnologia GSM (2G), deve-se ter um limiar de recepção do canal BCCH de -95 dBm; para a tecnologia WCDMA, HSPA e HSPA+ (3G), deve-se ter um limiar de recepção do canal piloto CPICH de -102 dBm e deve-se ter o percentual de cobertura dentro do polígono georreferenciado considerando dois patamares, $CPICH \geq -95 \text{ dBm}$ e $CPICH \geq -102 \text{ dBm}$; para a tecnologia LTE (4G) deve-se ter um limiar de recepção do RSRP de -110 dBm; e deve-se ter o percentual de cobertura dentro do polígono georreferenciado considerando dois patamares, $RSRP \geq -102 \text{ dBm}$ e $RSRP \geq -110 \text{ dBm}$ [51].

Se a retirada de trechos ou pontos de medição for necessária, poderá ser feita, desde que diferenças pontuais não reflitam na legitimidade das medidas de campo. Para múltiplas medidas na mesma coordenada, deve-se registrar somente um valor obtido a partir do percentil 10 em dBm e cada ponto terá que ter valores com o identificador da estação, podendo excluir dados inconsistentes, como falta de medidas, coordenadas e valores inválidos [51].

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Neste capítulo, serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho e quais os métodos aplicados para chegar aos resultados.

3.1 Materiais utilizados e métodos adotados

Nesta seção, serão vistos os materiais utilizados, que são as pesquisas bibliográficas, os softwares/aplicativos, base de dados de estações, características das antenas e os métodos adotados para realização de todo estudo.

3.1.1 Pesquisa bibliográfica

Primeiramente foi feito uma revisão da literatura mostrando às redes móveis (1G, 2G, 3G, 4G, 5G), desenvolvida com base em materiais publicados em livros, revistas, artigos, dissertações e teses, ordenando, esquematizando, resumindo informações significativas e sintetizando ideias. Foram levantados os trabalhos mais importantes realizados sobre o tema, como também novidades e perspectivas, bem como organizações e entidades envolvidas no assunto a ser tratado.

3.1.2 Ferramentas de trabalho e métodos de aplicação

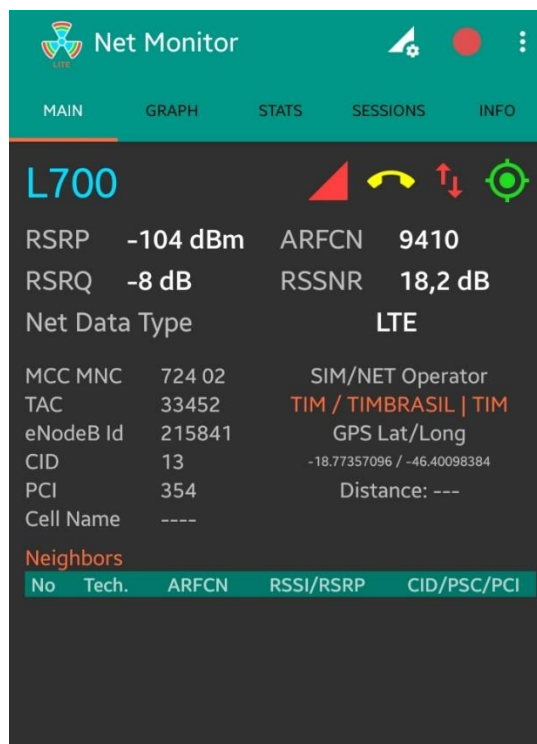
Além da pesquisa bibliográfica, foram feitos alguns testes de sinais com o intuito de verificar como estão os sinais de operadoras de telefonia móvel que atendem a cidade de Lagoa Formosa-MG. As medições do sinal foram realizadas por meio do *drive test* com uma velocidade de aproximadamente 30km/h, usando dois smartphones Samsung Galaxy J5 com um aplicativo, para Android chamado Net Monitor Cell Signal Logging processando os dados recebidos. O Net Monitor utiliza o Sistema de Posicionamento Global para fazer a coleta de dados, naquele ponto onde o usuário está, sendo possível coletar alguns parâmetros importantes determinantes na qualidade do sinal recebido e posteriormente tratar os dados coletados, para visualizar e analisar os níveis do sinal recebido.

Com o aplicativo Net Monitor, é possível verificar várias informações relevantes para medição dos padrões de qualidade, como: a operadora de telefonia, o padrão da tecnologia da prestadora, a força do sinal recebido, parâmetro de qualidade, dados sobre as estações base conectadas e vizinhas, código do país(MCC), código de operadora (MNC), código de área (TAC e LAC), identificação da célula (CID), entre outros. Por meio de medições pontuais pode-se então verificar, se as prestadoras de redes móveis operantes em cada região estão entregando o sinal, conforme estabelecido pela Anatel, bem como fazer uma comparação entre elas para saber qual delas está em melhor operação no momento.

Por meio do *drive test*, é possível verificar as coordenadas de cada ponto da rota realizada e seus respectivos parâmetros coletados, com isso por meio dos modelos de predição de Lee, Okumura, Hata, é possível estimar o sinal recebido, e comparar estes sinais medidos com sinais teóricos.

Na Figura 3.1 podemos verificar a interface quando entramos no aplicativo Net Monitor, onde traz as principais informações do sinal recebido e da operadora.

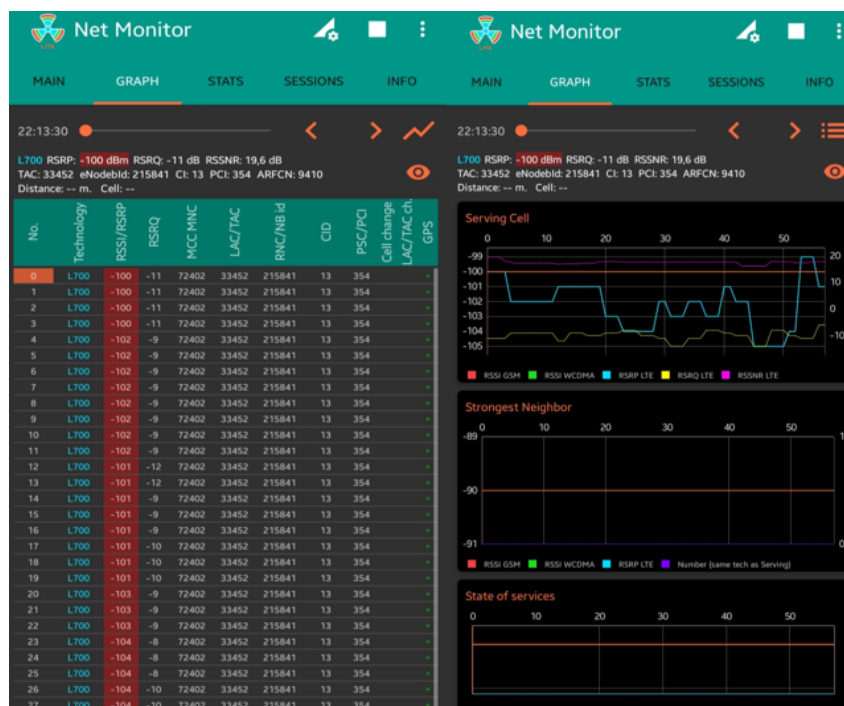
Figura 3.1 – Interface do software Net Monitor (Menu Inicial).



Fonte: o autor.

A Figura 3.2 nos mostra a interface com alguns valores quando é acionado a medição e a parte gráfica com os principais valores recebidos do sinal.

Figura 3.2 – Interface do software Net Monitor (Gráficos).



Fonte: o autor.

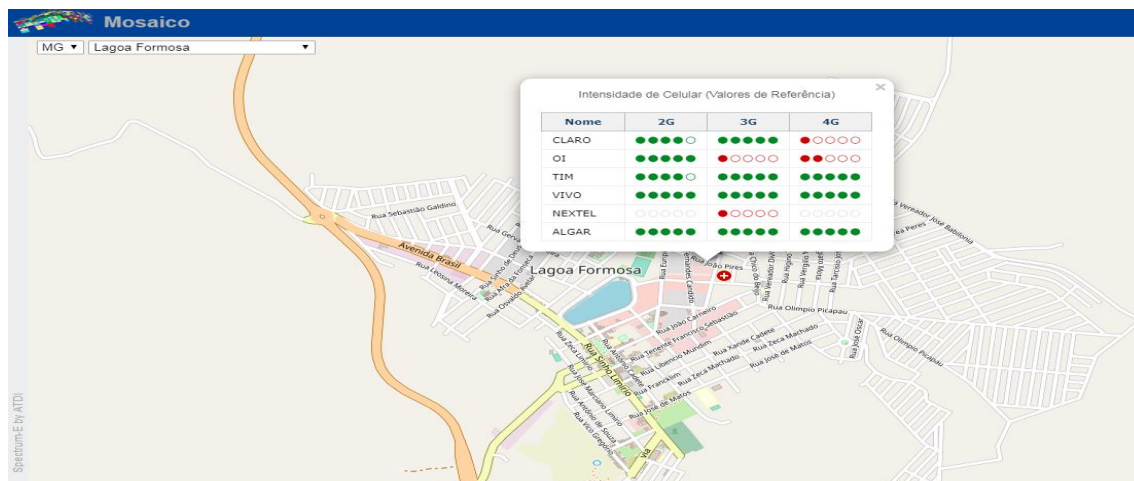
3.1.3 Cobertura da região estudada

Por meio de uma ferramenta do sistema Mosaico da ANATEL pode-se consultar a intensidade do sinal 2G, 3G e 4G das operadoras, em qualquer ponto desejado, então é possível ter uma previsão de uma cobertura. Lembrando que é somente uma previsão, com base em medias de dados, já coletados. O sinal real poderá variar de acordo com o dia devido a vários fatores como mobilidade, clima, estrutura, entre outros.

As informações do Mosaico são coletadas de um banco de dados, onde cada operadora faz o seu cadastro. É bom ressaltar que os dados ali colocados também são apresentados, na ANATEL em forma de números. No Mosaico é possível extrair relatórios do regulamento SGQ, bem como uma visualização gráfica. A Figura 3.3 mostra a intensidade do sinal em uma coordenada, em Lagoa Formosa-MG, de todas as operadoras em funcionamento, na localidade. Dentre as operadoras operantes em

Lagoa Formosa temos: Algar Telecom (2G, 3G, 4G), Claro (2G, 3G, 4G), Oi (2G, 3G, 4G), Tim (2G, 3G, 4G), Vivo (2G, 3G, 4G) e Nextel (3G).

Figura 3.3 – Intensidade Celular em uma coordenada de Lagoa Formosa-MG.



Fonte: Mosaico ANATEL.

3.1.4 Informações das torres celulares e antenas

Por meio do site da ANATEL, na seção Recuperação de frequência podemos consultar alguns dados importantes que serão usados no cálculo de predição, nele são encontrados dados da empresa, localização de bases, frequências, características das antenas, entre outros. Com isso é possível verificar manuais das antenas e coletar todas informações necessárias para um projeto de uma rede móvel. Na Figura 3.4 podemos ver o site da ANATEL em que consultamos as informações.

Figura 3.4 – Recuperação de frequência – ANATEL.

Recuperação de Frequências

Opções de consulta

Recuperar dados por: ☐ UF ☒ Município ☐ Coordenadas geográficas ☐ Modalidade de Serviço ☐ Geral

Apresentar dados por: ☐ A) Município e Entidade ☐ D) Modalidade e Município ☐ F) Frequência e Município ☐ I) Frequência e Coordenadas ☐ J) Frequência e Entidade ☐ K) Frequência e Unidade ☐ L) Coordenadas e Frequência ☐ M) Modalidade e Entidade

Faixa de Frequência

Inicial: Final: Unidade: Sigla da UF: Município Inicial: Município Final: Serviço Inicial: Serviço Final:

Opções para consulta diferenciada

Grupo de Estações: ☐ Somente Terrenas ☐ Somente Terrestres (exceto SCM, SHP e Trunking) ☐ Somente Trunking ☐ Somente Móvel Pessoal e SCM ☐ Todos (Consolidado)

Botões: Limpar Campos, Exportar Excel, Download TXT, Confirmar, Exportar Modelo SIGAnatel

Fonte: de acordo com [57].

A empresa de Telecomunicações Tim Celular S/A, CNPJ 04.206.050/0001-80 possui uma torre na Estação Nº 442748302, que fica na Praça Nossa Senhora da Piedade, Nº 374, Bairro Centro, CEP 38720-000, Latitude -18,777984 e Longitude -46,408229. Na Figura 3.5 podemos ver a torre e suas respectivas antenas instaladas.

Figura 3.5 – Torre da empresa TIM Celular.



Fonte: o autor.

A empresa de Telecomunicações Algar Telecom S/A, CNPJ 71.208.516/0001-74 possui uma torre na Estação Nº 697642119, que fica na Rua Eurípedes Ribeiro, Nº 954, Bairro Centro, CEP 38720-000, Latitude -18,7766666667 e Longitude -46,4005277778. Na Figura 3.6 podemos ver a torre e suas respectivas antenas instaladas.

Figura 3.6 – Torre da empresa Algar Telecom.



Fonte: o autor.

Capítulo 4 – Resultados e Análises

Neste capítulo serão apresentados os resultados que obtivemos com as medições em campo, as predições do sinal utilizando os modelos de propagação e análises de regulamentos da ANATEL.

4.1 Resultados das medições e predição do sinal

Nesta seção serão vistos os resultados obtidos, durante o *drive test* e nos modelos de propagação.

4.1.1 Rotas percorridas na região do bairro Planalto

A seguir serão vistos os mapas com as rotas percorridas em que foram realizadas as medições na cidade de Lagoa Formosa. As cores representadas no trajeto percorrido, tratam-se de níveis de sinais recebidos RSRP diferentes, as cores foram definidas de acordo o QoS, nas configurações do aplicativo. A cor verde representa um sinal de boa qualidade (maior ou igual a -75 dBm), amarela, um sinal razoável (menor que -75 dBm e maior ou igual a -90 dBm) e a vermelha, um sinal de baixa qualidade (menor que -90 dBm).

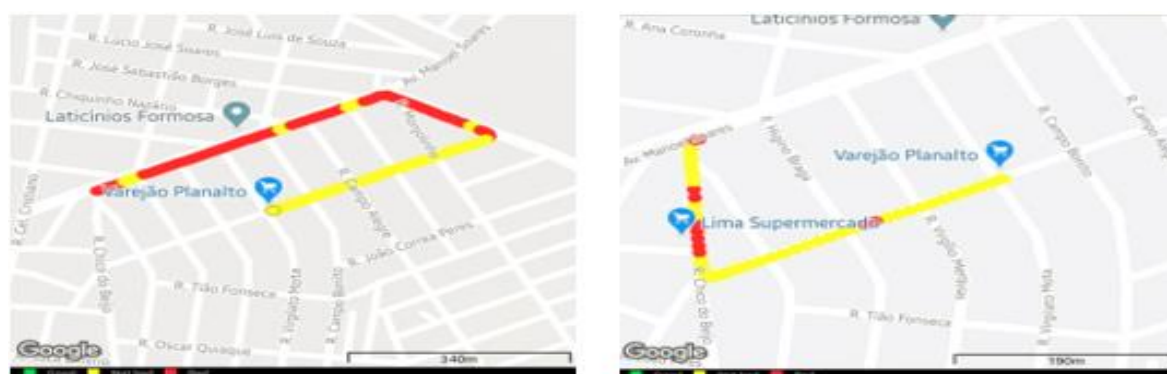
Nas Figuras 4.1 e 4.2 pode-se ver a rota percorrida no bairro Planalto, o local é um pouco distante dos locais de instalação das torres das operadoras, nesse bairro foram coletados 179 pontos de valores de RSRP. Na Figura 4.1, mostra-se a rota realizada usando o chip da Algar Telecom e na Figura 4.2 mostra-se a rota que se utilizou o chip da TIM. De acordo com o limiar definido pela ANATEL, para operadora Algar temos 177 pontos maiores que -103 dBm e 179 pontos maiores que -110 dBm. Para operadora TIM temos todos os pontos maiores que -103 dBm. Vale ressaltar, que mesmo a maioria estando de acordo com a norma, quando falamos em QoS não se consegue capturar um sinal excelente, que seria representado pela cor verde.

Figura 4.1 – Medições da Algar no bairro Planalto.



Fonte: o autor.

Figura 4.2 – Medições da TIM no bairro Planalto.



Fonte: o autor.

A seguir nas próximas tabelas, verifica-se as medições realizadas por meio do *drive test*, como também a aplicação dos modelos de propagação mostrando os valores dos parâmetros que regem as equações. Todas as medições foram realizadas no dia 16/02/2020 e exportadas do aplicativo Net Monitor em um arquivo no formato csv, e tratadas para uma melhor visualização. Para as rotas realizadas acima, foram coletados 179 pontos para cada operadora, mas foi selecionado 19 pontos para mostrar como exemplo. Se desejado, todos os 179 pontos coletados com suas respectivas informações, podem ser consultados no arquivo original csv. Todos os cálculos referentes aos modelos de propagação, foram realizados por meio do Microsoft Excel, neste arquivo contém, termo por termo, fórmulas aplicadas e gráficos gerados [58].

Tabela 4.1 – Medição realizada por *drive test* para operadora Algar usando LTE 700 MHz.

PONTOS	MCC	MNC	LAC/TAC	NODE ID	CID	PSC/PSI	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	RSSNR [dB]	LATITUDE	LONGITUDE
1	724	34	57034	20457	1	40	-96,00	-12,00	14,40	-18,77165536	-46,40125794
10	724	34	57034	20457	1	40	-91,00	-12,00	14,60	-18,77135921	-46,40063945
20	724	34	57034	20457	1	40	-94,00	-8,00	14,60	-18,77097841	-46,39981233
30	724	34	57034	20457	1	40	-98,00	-8,00	14,80	-18,77057857	-46,39894858
40	724	34	57034	20457	1	40	-87,00	-9,00	13,40	-18,77018173	-46,39807808
50	724	34	57034	20457	1	40	-95,00	-8,00	16,60	-18,76979288	-46,39721461
60	724	34	57034	20457	1	40	-103,00	-10,00	13,20	-18,76993735	-46,39647466
70	724	34	57034	20457	1	40	-99,00	-8,00	14,00	-18,77037345	-46,39563547
80	724	34	57034	20457	1	40	-105,00	-11,00	14,20	-18,77078970	-46,39588542
90	724	34	57034	20457	1	40	-92,00	-8,00	14,20	-18,77116699	-46,39672124
100	724	34	57034	20457	1	40	-89,00	-8,00	14,40	-18,77153039	-46,39752484
110	724	34	57034	20457	1	40	-96,00	-12,00	14,20	-18,77186341	-46,39823055
120	724	34	57034	20457	1	40	-93,00	-8,00	16,00	-18,77210181	-46,39874203
130	724	34	57034	20457	1	40	-94,00	-12,00	16,20	-18,77247649	-46,39955270
140	724	34	57034	20457	1	40	-94,00	-11,00	16,20	-18,77296221	-46,40059418
150	724	34	57034	20457	1	40	-96,00	-9,00	16,00	-18,77315081	-46,40099853
160	724	34	57034	20457	1	40	-95,00	-12,00	14,60	-18,77313279	-46,40114776
170	724	34	57034	20457	1	40	-93,00	-9,00	15,00	-18,77238813	-46,40122217
179	724	34	57034	20457	1	40	-95,00	-14,00	16,80	-18,77164849	-46,40122876

Fonte: o autor.

Tabela 4.2 – Medição realizada por *drive test* para operadora Algar usando LTE 700 MHz.

PONTOS	MCC	MNC	LAC/TAC	NODE ID	CID	PSC/PSI	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	RSSNR [dB]	LATITUDE	LONGITUDE
1	724	2	33496	215841	13	354	-95,00	-7,00	15,00	-18,77165536	-46,40125794
10	724	2	33496	215841	13	354	-93,00	-6,00	17,20	-18,77135921	-46,40063945
20	724	2	33496	215841	13	354	-98,00	-7,00	17,80	-18,77097841	-46,39981233
30	724	2	33496	215841	13	354	-96,00	-8,00	20,80	-18,77057857	-46,39894858
40	724	2	33496	215841	13	354	-96,00	-10,00	14,00	-18,77018173	-46,39807808
50	724	2	33496	215841	13	354	-96,00	-10,00	16,00	-18,76979288	-46,39721461
60	724	2	33496	215841	13	354	-99,00	-9,00	18,40	-18,76993735	-46,39647466
70	724	2	33496	215841	13	354	-94,00	-4,00	22,20	-18,77037345	-46,39563547
80	724	2	33496	215841	13	354	-85,00	-7,00	20,20	-18,77078970	-46,39588542
90	724	2	33496	215841	13	354	-83,00	-11,00	23,00	-18,77116699	-46,39672124
100	724	2	33496	215841	13	354	-91,00	-10,00	20,20	-18,77153039	-46,39752484
110	724	2	33496	215841	13	354	-87,00	-11,00	23,20	-18,77186341	-46,39823055
120	724	2	33496	215841	13	354	-90,00	-8,00	24,00	-18,77210181	-46,39874203
130	724	2	33496	215841	13	354	-90,00	-10,00	23,60	-18,77247649	-46,39955270
140	724	2	33496	215841	13	354	-87,00	-7,00	25,00	-18,77296221	-46,40059418
150	724	2	33496	215841	13	354	-92,00	-11,00	22,20	-18,77315081	-46,40099853
160	724	2	33496	215841	13	354	-91,00	-9,00	22,20	-18,77313279	-46,40114776
170	724	2	33496	215841	13	354	-93,00	-14,00	23,20	-18,77238813	-46,40122217
179	724	2	33496	215841	13	354	-96,00	-8,00	17,40	-18,77164849	-46,40122876

Fonte: o autor.

Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Lee para Algar.

PONTOS	Pr [dBm]	Po [dBm]	γ [dB/decada]	r [km]	r0 [Km]	Af [dB]	he [m]	h1 [m]	Geffh(he,h1) [dB]	L	α
1	-41,91114605	-61,7	38,4	0,646885434	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
10	-42,71478357	-61,7	38,4	0,678821256	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
20	-43,9844536	-61,7	38,4	0,732520455	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
30	-45,48827518	-61,7	38,4	0,801644425	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
40	-47,05673767	-61,7	38,4	0,880698292	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
50	-48,60166006	-61,7	38,4	0,966183258	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
60	-49,0177322	-61,7	38,4	0,99059178	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
70	-49,16240055	-61,7	38,4	0,999222317	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
80	-48,11584147	-61,7	38,4	0,93844318	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
90	-46,28394585	-61,7	38,4	0,84081871	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
100	-44,39348154	-61,7	38,4	0,750708833	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
110	-42,60206652	-61,7	38,4	0,674248662	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
120	-41,26977106	-61,7	38,4	0,622479278	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
130	-39,16480998	-61,7	38,4	0,548666196	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
140	-36,71725759	-61,7	38,4	0,473772513	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
150	-35,9763694	-61,7	38,4	0,453185387	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
160	-36,15563562	-61,7	38,4	0,45808312	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
170	-39,31216979	-61,7	38,4	0,55353578	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3
179	-41,92139282	-61,7	38,4	0,647283021	1,6	1,686417715	30	30	0	0	3

Fonte: o autor.

Tabela 4.4 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Lee para TIM.

PONTOS	Pr [dBm]	Po [dBm]	γ [dB/decada]	r [km]	r0 [Km]	Af [dB]	he [m]	h1 [m]	Geffh(he,h1) [dB]	L	α
1	-45,25141397	-61,7	38,4	1,169286516	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
10	-46,3617344	-61,7	38,4	1,249785657	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
20	-47,73181974	-61,7	38,4	1,356796897	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
30	-49,06160378	-61,7	38,4	1,469415561	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
40	-50,30305395	-61,7	38,4	1,582975037	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
50	-51,45023335	-61,7	38,4	1,695698084	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
60	-52,03421078	-61,7	38,4	1,756128436	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
70	-52,52723442	-61,7	38,4	1,808820338	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
80	-52,02259235	-61,7	38,4	1,754905406	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
90	-50,9286248	-61,7	38,4	1,643482083	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
100	-49,80504814	-61,7	38,4	1,536403064	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
110	-48,74166448	-61,7	38,4	1,441494143	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
120	-47,92934474	-61,7	38,4	1,372962648	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
130	-46,55929557	-61,7	38,4	1,264679148	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
140	-44,61510634	-61,7	38,4	1,125512779	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
150	-43,79617313	-61,7	38,4	1,071578632	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
160	-43,5869639	-61,7	38,4	1,058219811	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
170	-44,38078127	-61,7	38,4	1,10980893	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321
179	-45,29641404	-61,7	38,4	1,172445917	1,6	1,686417715	45	45	0	0	9,5321

Fonte: o autor.

Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Okumura para Algar.

PONTOS	Pr[dBm]	Pt[dBw]	Gt [dBi]	Gr[dBi]	L [dB]	A0 [m]	d [km]	Amu(f,d) [dB]	G(hte) [dB]	G(hre) [dB]	G(area) [dB]
1	-58,58476045	13,01029996	13,9	0,1	115,5950604	-87,10658564	0,64680	17	-16,4781748	-3,0103000	8
10	-58,16619924	13,01029996	13,9	0,1	115,1764992	-86,68802443	0,67882	17	-16,4781748	-3,0103000	8
20	-57,50491277	13,01029996	13,9	0,1	114,5152127	-86,02673795	0,73252	17	-16,4781748	-3,0103000	8
30	-56,72167236	13,01029996	13,9	0,1	113,7319723	-85,24349754	0,80164	17	-16,4781748	-3,0103000	8
40	-55,90476482	13,01029996	13,9	0,1	112,9150648	-84,42659000	0,88070	17	-16,4781748	-3,0103000	8
50	-55,10011774	13,01029996	13,9	0,1	112,1104177	-83,62194292	0,96618	17	-16,4781748	-3,0103000	8
60	-54,88341350	13,01029996	13,9	0,1	111,8937135	-83,40523868	0,99059	17	-16,4781748	-3,0103000	8
70	-54,80806540	13,01029996	13,9	0,1	111,8183654	-83,32989058	0,99922	17	-16,4781748	-3,0103000	8
80	-55,35314825	13,01029996	13,9	0,1	112,3634482	-83,87497344	0,93844	17	-16,4781748	-3,0103000	8
90	-56,30726055	13,01029996	13,9	0,1	113,3175605	-84,82908574	0,84082	17	-16,4781748	-3,0103000	8
100	-57,29187738	13,01029996	13,9	0,1	114,3021773	-85,81370257	0,75071	17	-16,4781748	-3,0103000	8
110	-58,22490604	13,01029996	13,9	0,1	115,2352060	-86,74673122	0,67425	17	-16,4781748	-3,0103000	8
120	-58,91880993	13,01029996	13,9	0,1	115,9291099	-87,44063511	0,62248	17	-16,4781748	-3,0103000	8
130	-60,01514382	13,01029996	13,9	0,1	117,0254438	-88,53696901	0,54867	17	-16,4781748	-3,0103000	8
140	-61,28991069	13,01029996	13,9	0,1	118,3002106	-89,81173587	0,47377	17	-16,4781748	-3,0103000	8
150	-61,67578996	13,01029996	13,9	0,1	118,6860899	-90,19761514	0,45319	17	-16,4781748	-3,0103000	8
160	-61,58242213	13,01029996	13,9	0,1	118,5927221	-90,10424731	0,45808	17	-16,4781748	-3,0103000	8
170	-59,93839392	13,01029996	13,9	0,1	116,9486939	-88,46021910	0,55354	17	-16,4781748	-3,0103000	8
179	-58,57942359	13,01029996	13,9	0,1	115,5897236	-87,10124878	0,64728	17	-16,4781748	-3,0103000	8

Fonte: o autor.

Tabela 4.6 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Okumura para TIM.

PONTOS	Pr[dBm]	Pt[dBw]	Gt [dBi]	Gr[dBi]	L [dB]	A0 [m]	d [km]	Amu(f,d) [dB]	G(hte) [dB]	G(hre) [dB]	G(area) [dB]
1	-48,31076393	16,02059991	14,5	0,1	109	-81,96471425	1,16929	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
10	-47,73247204	16,02059991	14,5	0,1	108	-81,38642236	1,24979	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
20	-47,01888593	16,02059991	14,5	0,1	108	-80,67283625	1,35680	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
30	-46,32629007	16,02059991	14,5	0,1	107	-79,98024039	1,46942	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
40	-45,67970144	16,02059991	14,5	0,1	106	-79,33365176	1,58298	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
50	-45,08221217	16,02059991	14,5	0,1	106	-78,73616249	1,69570	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
60	-44,77805726	16,02059991	14,5	0,1	105	-78,43200758	1,75613	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
70	-44,52127412	16,02059991	14,5	0,1	105	-78,17522443	1,80882	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
80	-44,78410852	16,02059991	14,5	0,1	105	-78,43805884	1,75491	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
90	-45,35388329	16,02059991	14,5	0,1	106	-79,00783361	1,64348	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
100	-45,93907947	16,02059991	14,5	0,1	107	-79,59302979	1,53640	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
110	-46,49292512	16,02059991	14,5	0,1	107	-80,14687544	1,44149	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
120	-46,91600832	16,02059991	14,5	0,1	108	-80,56995864	1,37296	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
130	-47,6295756	16,02059991	14,5	0,1	108	-81,28352592	1,26468	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
140	-48,64217415	16,02059991	14,5	0,1	109	-82,29612447	1,12551	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
150	-49,06870187	16,02059991	14,5	0,1	110	-82,72265219	1,07158	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
160	-49,17766501	16,02059991	14,5	0,1	110	-82,83161533	1,05822	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
170	-48,76421846	16,02059991	14,5	0,1	109	-82,41816878	1,10981	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8
179	-48,28732639	16,02059991	14,5	0,1	109	-81,94127671	1,17245	19,0000000000	-12,95634964	-3,010299957	8

Fonte: o autor.

Tabela 4.7 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Hata para Algar.

PONTOS	Pr [dBm]	Pt [dBw]	Gt [dBi]	Gr [dBi]	L suburbano[dB]	L urbano [dB]	a(hre) [dB]	d[Km]
1	-46,66706661	13,01029996	13,9	0,1	103,677366563	116,89431163	0,0060588236	0,64680
10	-47,40425452	13,01029996	13,9	0,1	104,414554477	117,63149955	0,0060588236	0,67882
20	-48,56894055	13,01029996	13,9	0,1	105,579240511	118,79618558	0,0060588236	0,73252
30	-49,94841707	13,01029996	13,9	0,1	106,958717028	120,17566210	0,0060588236	0,80164
40	-51,3871896	13,01029996	13,9	0,1	108,397489557	121,61443463	0,0060588236	0,88070
50	-52,80436846	13,01029996	13,9	0,1	109,814668413	123,03161348	0,0060588236	0,96618
60	-53,18603724	13,01029996	13,9	0,1	110,196337196	123,41328227	0,0060588236	0,99059
70	-53,31874354	13,01029996	13,9	0,1	110,329043496	123,54598857	0,0060588236	0,99922
80	-52,35872029	13,01029996	13,9	0,1	109,369020247	122,58596532	0,0060588236	0,93844
90	-50,67829688	13,01029996	13,9	0,1	107,688596838	120,90554191	0,0060588236	0,84082
100	-48,94414759	13,01029996	13,9	0,1	105,954447548	119,17139262	0,0060588236	0,75071
110	-47,3008576	13,01029996	13,9	0,1	104,311157555	117,52810263	0,0060588236	0,67425
120	-46,07872438	13,01029996	13,9	0,1	103,089024341	116,30596941	0,0060588236	0,62248
130	-44,14781421	13,01029996	13,9	0,1	101,158114168	114,37505924	0,0060588236	0,54867
140	-41,90264026	13,01029996	13,9	0,1	98,912940217	112,12988529	0,0060588236	0,47377
150	-41,22301318	13,01029996	13,9	0,1	98,233313141	111,45025821	0,0060588236	0,45319
160	-41,38745659	13,01029996	13,9	0,1	98,397756546	111,61470162	0,0060588236	0,45808
170	-44,28298942	13,01029996	13,9	0,1	101,293289377	114,51023445	0,0060588236	0,55354
179	-46,67646611	13,01029996	13,9	0,1	103,686766069	116,90371114	0,0060588236	0,64728

Fonte: o autor.

Tabela 4.8 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Hata para TIM.

PONTOS	Pr [dBm]	Pt [dBw]	Gt [dBi]	Gr [dBi]	L suburbano[dB]	L urbano [dB]	a(hre) [dB]	d [Km]
1	-49,60092949	16,02059991	14,5	0,1	110,221529401	123,43847447	0,0060588236	1,16929
10	-50,58609188	16,02059991	14,5	0,1	111,206691795	124,42363687	0,0060588236	1,24979
20	-51,80173785	16,02059991	14,5	0,1	112,422337760	125,63928283	0,0060588236	1,35680
30	-52,98162538	16,02059991	14,5	0,1	113,602225294	126,81917037	0,0060588236	1,46942
40	-54,08313625	16,02059991	14,5	0,1	114,703736166	127,92068124	0,0060588236	1,58298
50	-55,10100278	16,02059991	14,5	0,1	115,721602689	128,93854776	0,0060588236	1,69570
60	-55,61915285	16,02059991	14,5	0,1	116,239752760	129,45669783	0,0060588236	1,75613
70	-56,05660165	16,02059991	14,5	0,1	116,677201564	129,89414663	0,0060588236	1,80882
80	-55,60884407	16,02059991	14,5	0,1	116,229443987	129,44638906	0,0060588236	1,75491
90	-54,63819123	16,02059991	14,5	0,1	115,258791140	128,47573621	0,0060588236	1,64348
100	-53,64126687	16,02059991	14,5	0,1	114,261866783	127,47881185	0,0060588236	1,53640
110	-52,69775042	16,02059991	14,5	0,1	113,318350336	126,53529541	0,0060588236	1,44149
120	-51,97699735	16,02059991	14,5	0,1	112,597597264	125,81454234	0,0060588236	1,37296
130	-50,76138347	16,02059991	14,5	0,1	111,381983383	124,59892845	0,0060588236	1,26468
140	-49,03634801	16,02059991	14,5	0,1	109,656947927	122,87389300	0,0060588236	1,12551
150	-48,30972696	16,02059991	14,5	0,1	108,930326872	122,14727194	0,0060588236	1,07158
160	-48,1241003	16,02059991	14,5	0,1	108,744700216	121,96164529	0,0060588236	1,05822
170	-48,82843664	16,02059991	14,5	0,1	109,449036553	122,66598162	0,0060588236	1,10981
179	-49,64085704	16,02059991	14,5	0,1	110,261456956	123,47840203	0,0060588236	1,17245

Fonte: o autor.

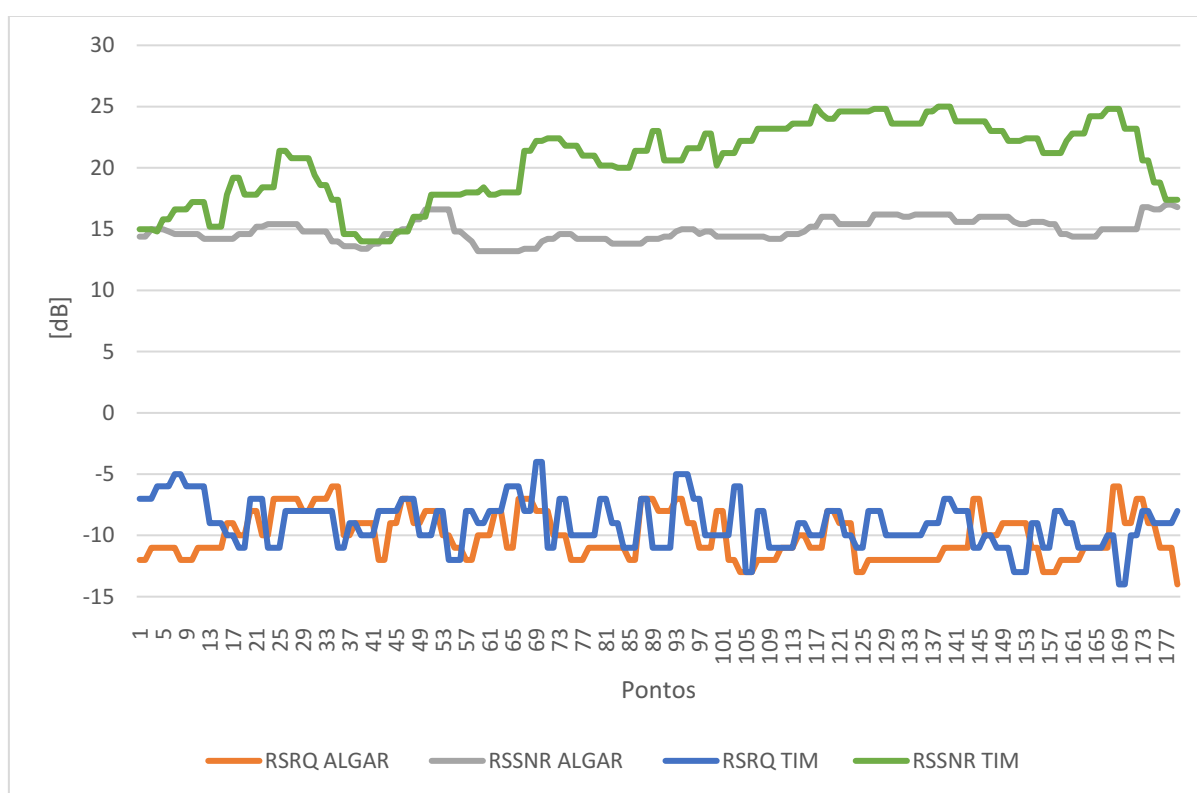
Tabela 4.9 - Potência recebida pelo *drive test* e pelos modelos de propagação.

PONTOS	NET MONITOR ALGAR [dBm]	NET MONITOR TIM [dBm]	LEE ALGAR [dBm]	LEE TIM [dBm]	OKUMURA ALGAR [dBm]	OKUMURA TIM [dBm]	HATA ALGAR [dBm]	HATA TIM [dBm]
1	-96	-95	-41,91114605	-45,25141397	-58,58476045	-48,31076393	-46,66706661	-49,60092949
10	-91	-93	-42,71478357	-46,36173440	-58,16619924	-47,73247204	-47,40425452	-50,58609188
20	-94	-98	-43,98445360	-47,73181974	-57,50491277	-47,01888593	-48,56894055	-51,80173785
30	-98	-96	-45,48827518	-49,06160378	-56,72167236	-46,32629007	-49,94841707	-52,98162538
40	-87	-96	-47,05673767	-50,30305395	-55,90476482	-45,67970144	-51,38718960	-54,08313625
50	-95	-96	-48,60166006	-51,45023335	-55,10011774	-45,08221217	-52,80436846	-55,10100278
60	-103	-99	-49,01773220	-52,03421078	-54,88341350	-44,77805726	-53,18603724	-55,61915285
70	-99	-94	-49,16240055	-52,52723442	-54,80806540	-44,52127412	-53,31874354	-56,05660165
80	-105	-85	-48,11584147	-52,02259235	-55,35314825	-44,78410852	-52,35872029	-55,60884407
90	-92	-83	-46,28394585	-50,92862480	-56,30726055	-45,35388329	-50,67829688	-54,63819123
100	-89	-91	-44,39348154	-49,80504814	-57,29187738	-45,93907947	-48,94414759	-53,64126687
110	-96	-87	-42,60206652	-48,74166448	-58,22490604	-46,49292512	-47,30085760	-52,69775042
120	-93	-90	-41,26977106	-47,92934474	-58,91880993	-46,91600832	-46,07872438	-51,97699735
130	-94	-90	-39,16480998	-46,55929557	-60,01514382	-47,62957560	-44,14781421	-50,76138347
140	-94	-87	-36,71725759	-44,61510634	-61,28991069	-48,64217415	-41,90264026	-49,03634801
150	-96	-92	-35,97636940	-43,79617313	-61,67578996	-49,06870187	-41,22301318	-48,30972696
160	-95	-91	-36,15563562	-43,58696390	-61,58242213	-49,17766501	-41,38745659	-48,12410030
170	-93	-93	-39,31216979	-44,38078127	-59,93839392	-48,76421846	-44,28298942	-48,82843664
179	-95	-96	-41,92139282	-45,29641404	-58,57942359	-48,28732639	-46,67646611	-49,64085704
VALOR MÉDIO	-95,00000000	-93,00000000	-43,42249672	-48,38657207	-57,79759865	-46,67786909	-48,05344966	-52,38268490
DESVIO PADRÃO	3,99489663	5,13464431	4,34035581	2,96166119	2,26060198	1,54253187	3,98146894	2,62781549
DESVIO MÉDIO	3,13105084	4,27483537	3,68207578	2,58180624	1,91774780	1,34469075	3,37761949	2,29077873

Fonte: o autor.

Conforme a Tabela 4.1 e Tabela 4.2 verifica-se dois parâmetros importantes que são o RSRQ e o RSSNR, com isso plota-se o gráfico Gráfico 4.1, para uma visualização do sinal nas duas operadoras. Para o RSRQ, percebe-se que os valores são bem parecidos para duas operadoras e que estão razoáveis, em alguns pontos com o sinal ótimo, pois quanto mais se aproxima do zero é melhor. Para os valores de RSSNR, a TIM tem um ótimo desempenho, pois grande parte do sinal está acima de 20dB. O sinal da Algar também é considerado bom, pois se manteve na faixa de 15dB.

Gráfico 4.1 – Valores de RSRQ e RSSNR para Algar e TIM.



Fonte: o autor.

Na tabela 4.10 verifica-se alguns parâmetros estatísticos dos sinais recebidos, como valor médio, máximo e mínimo. Considerando todos os 179 pontos medidos na prática e analisando o QoS, a TIM obteve um valor médio de -93 dB e um valor máximo de -78dB considerados bons, obteve também valor mínimo de -101dB que é considerado ruim. A Algar Telecom possuiu valores bem parecidos, valor médio de -95dB e valor máximo -86dB considerados bons e um valor mínimo de -105dB considerado ruim. É possível observar também os valores obtidos por meio dos modelos de propagação predito, o melhor valor médio é -43,42249672dB e o melhor

valor máximo é - 35,87530517dB, valores encontrados usando o modelo de Lee. O valor mínimo, que é o pior valor predito, é o Okumura da Algar, e devido a diferença entre real e medido é o que mais se aproximou da prática.

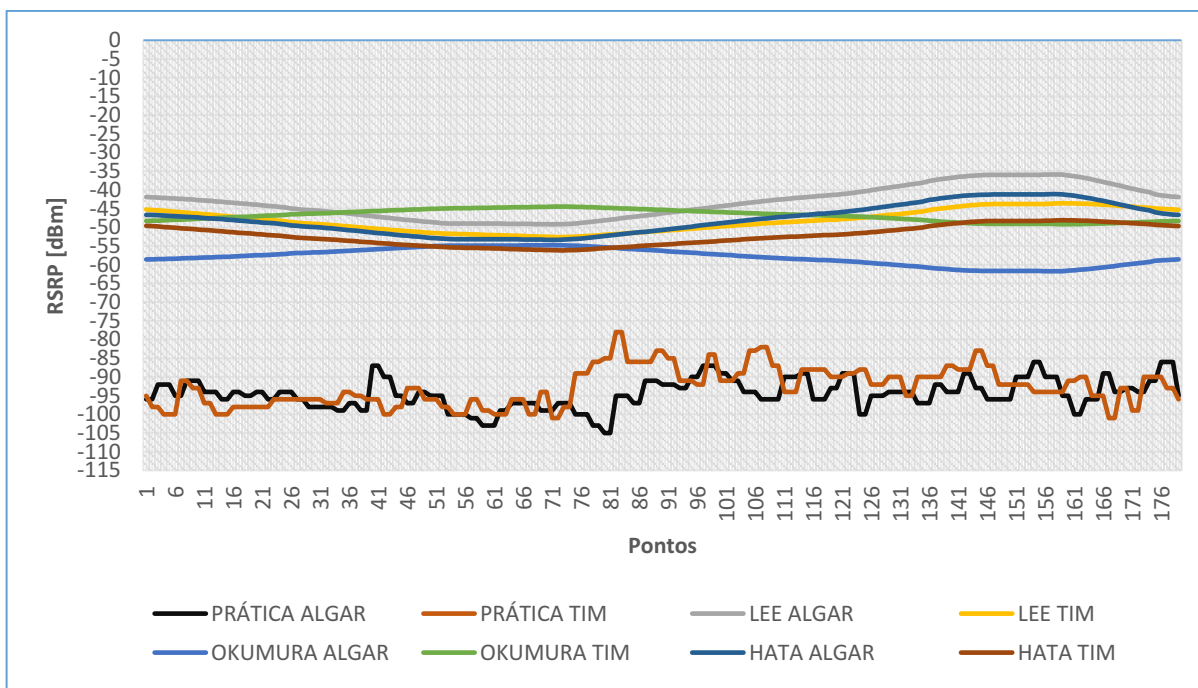
Tabela 4.10 – Estatísticas dos sinais recebidos RSRP.

RSRP	PRÁTICA ALGAR	PRÁTICA TIM	LEE ALGAR	LEE TIM	OKUMURA ALGAR	OKUMURA TIM	HATA ALGAR	HATA TIM
VALOR MÉDIO	-95,00000000	-93,00000000	-43,42249672	-48,38657207	-57,79759865	-46,67786909	-48,05344966	-52,38268490
VALOR MÁXIMO	-86,00000000	-78,00000000	-35,87530517	-43,56490145	-54,78481912	-44,46602483	-41,13030555	-48,10452478
VALOR MÍNIMO	-105,00000000	-101,00000000	-49,20703340	-52,63331304	-61,72842758	-49,18915587	-53,35968588	-56,15072283

Fonte: o autor.

No gráfico 4.2 pode-se verificar uma comparação entre os valores de RSRP medidos em campo, bem como também uma comparação de todos modelos de propagação aplicados. Percebe-se que os valores dos modelos se assemelharam muito, intuitivamente percebe-se que o Okumura da Algar é o que mais chega perto dos valores coletados, mesmo assim ainda há uma grande diferença entre a prática.

Gráfico 4.2 – Valores de RSRP medidos e calculados no bairro Planalto.



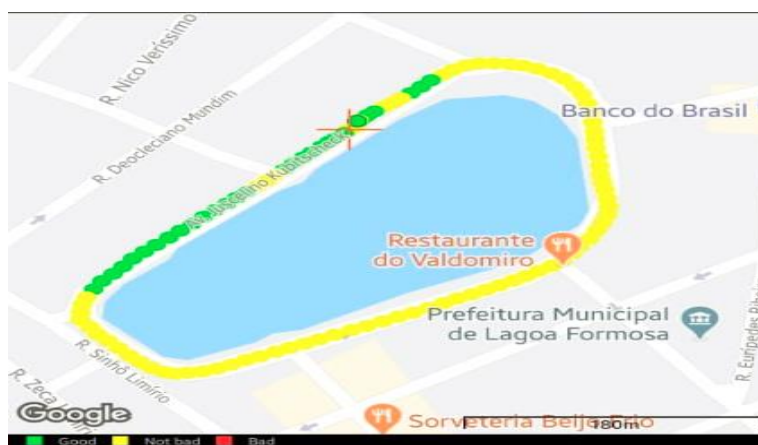
Fonte: o autor.

Os modelos de predição apresentam valores melhores que os de medições, isto deve ao fato que quando aplicamos estes modelos não levamos em consideração fenômenos que podem ocorrer no exato momento da medição, como é o caso do tempo, pressão, temperatura, vegetação, objetos durante o percurso, etc.

4.1.2 Rotas percorridas na região do Centro.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, verifica-se outra rota percorrida, com uma distância bem curta da coordenada das torres das operadoras, foram coletados 118 pontos de valores de RSRP. Na Figura 4.3 vê-se a rota realizada usando o chip da Algar Telecom e na Figura 4.4 a rota usando o chip da TIM. Agora como percebe-se não aparece sinal de má qualidade representado pelo vermelho, e já aparece a cor verde representando um sinal de boa qualidade. Com essas medidas, podemos verificar que todos os pontos medidos, tanto da Algar quanto da TIM estão de acordo com o limiar definido pela ANATEL, possuindo 118 pontos maiores que -103 dBm, e 118 pontos maiores que -110 dBm.

Figura 4.3 – Medições da Algar Telecom no bairro Centro.



Fonte: autor

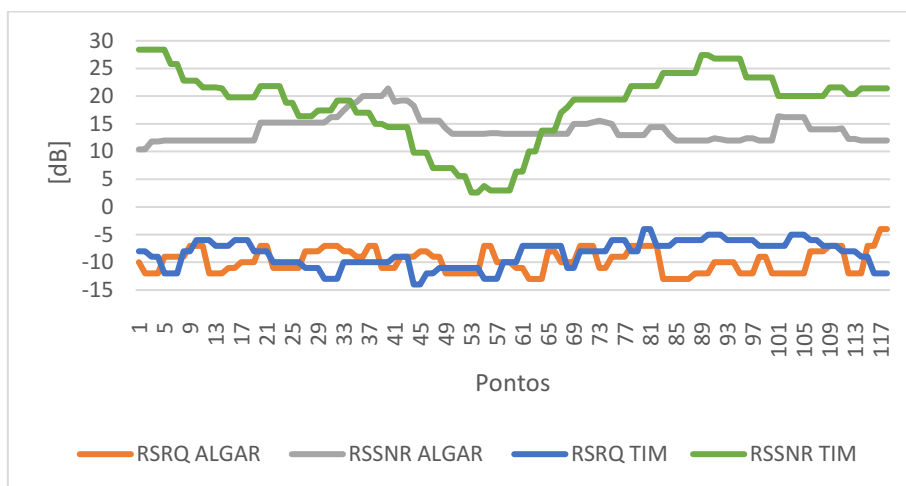
Figura 4.4 – Medições da TIM no bairro Centro.



Fonte: autor

No Gráfico 4.3 observa-se os valores de RSRQ e RSSNR tanto para TIM quanto para Algar. Os valores de RSRQ se assemelham muito para as duas operadoras e estão em uma boa faixa, os valores de RSSNR oscilam muito durante o percurso chegando a pontos ótimos, mas, também a pontos ruins.

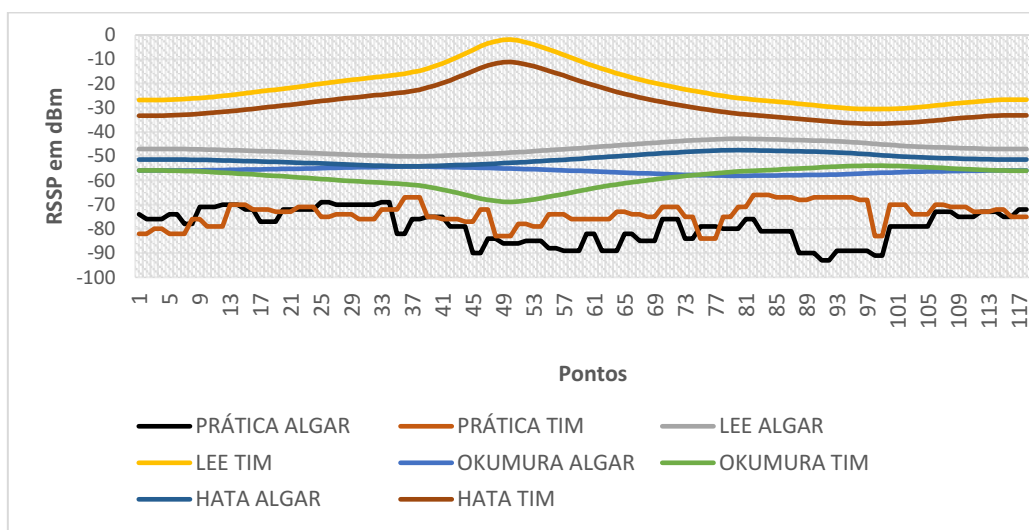
Gráfico 4.3 – Valores de RSRQ e RSSNR para Algar e TIM.



Fonte: o autor.

Foi feita a predição para esta região do Centro, mesmo bairro onde encontra-se as torres das operadoras, mas foi verificado que devido a distância ser pequena entre estação base e móvel, os valores diferem muito da realidade, sendo assim os modelos de propagação não se enquadram perfeitamente como podemos verificar no Gráfico 4.4.

Gráfico 4.4 – Valores de RSRP medidos e calculados no bairro Centro.



Fonte: o autor.

Como percebe-se, temos os valores medidos no *drive test* e os valores para cada modelo de propagação, quando se trata da operadora da TIM os valores ficaram surreais devido não se enquadrar perfeitamente nas premissas dos modelos.

4.1.3 Métricas de Erros

Através de alguns métodos de ajustes, é possível realizar alguns cálculos de métricas de erros, sendo os principais o MAD, RSE, RMSE. O desvio médio absoluto (MAD) é a soma das diferenças absolutas entre o valor real e a previsão dividida pelo número de medições. O erro quadrático médio (MSE) é provavelmente a métrica de erro mais usada, ele penaliza erros maiores porque o quadrado de números maiores tem um impacto maior do que o quadrado de números menores. O MSE é a soma dos erros ao quadrado divididos pelo número de observações. O erro quadrático médio da raiz (RMSE) é a raiz quadrada do MSE. Podemos visualizar a fórmula para calcular os erros nas equações (2.21), (2.22) e (2.23), n são os valores da amostra, A_t são os valores medidos em campo e F_t os valores obtidos através dos modelos de predição [56].

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (2.21)$$

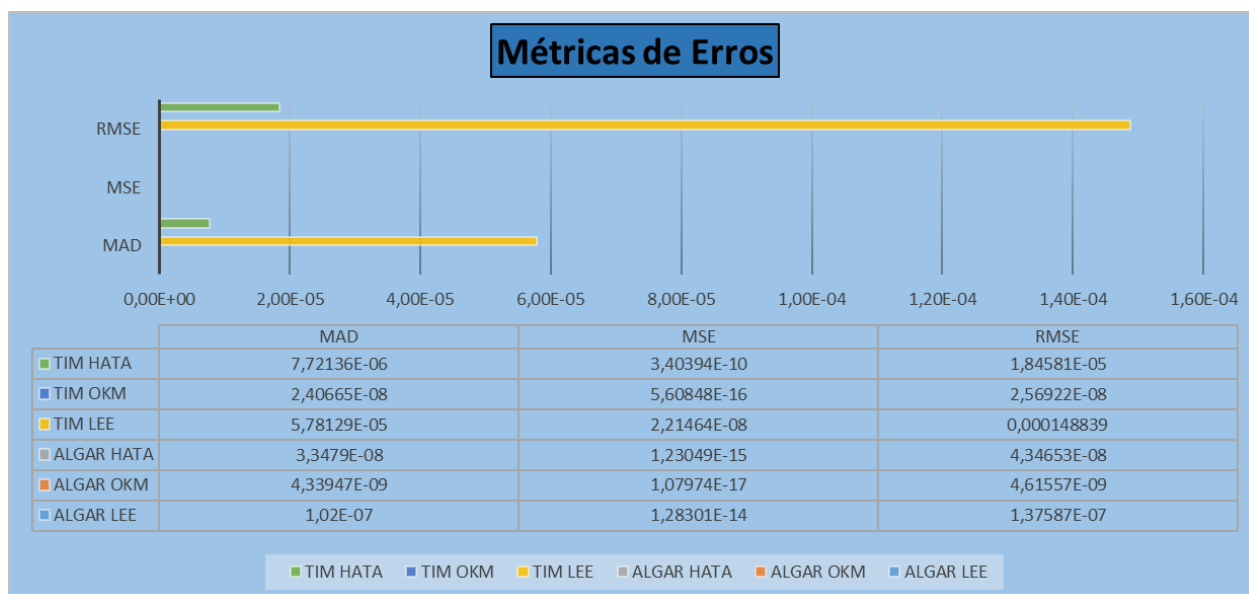
$$\text{MSE} = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad (2.22)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (2.23)$$

Para verificar qual o método que apresentou menor erro, é necessária uma análise de todos os sinais em cada coordenada, então precisamos de todos os valores recebidos através do Net Monitor e os valores preditos pelos modelos de propagação em Watts, e aplica-se as métricas de erros para todos os pontos das rotas. Aplicando o MAD, MSE e RMSE, temos o Gráfico 4.5 e nele percebe-se que o Modelo de Okumura é o que apresenta menor erro, ou seja, ele é um modelo que poderá ser

estudado mais detalhadamente e ser ajustado através de alguns métodos ainda a serem definidos para posteriores previsões na região.

Tabela 4.5 – Métricas de Erros: MAD, MSE, RMSE.



Fonte: o autor.

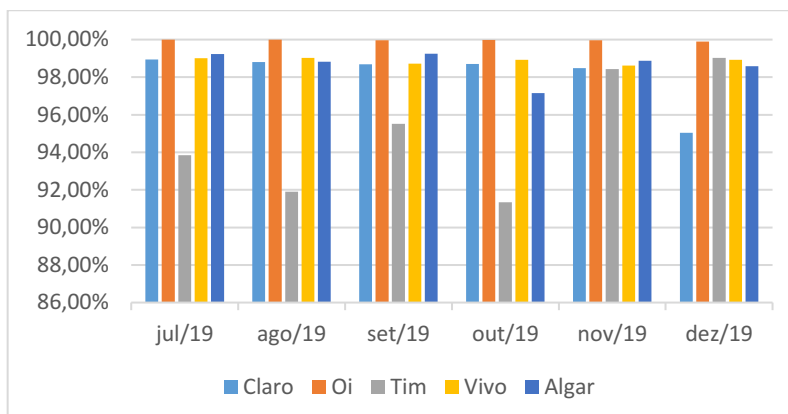
4.2 Verificação do cumprimento de Indicadores de Qualidade

Nesta seção observa-se como as operadoras estão operando, na cidade de Lagoa Formosa, por meio de uma pesquisa exploratória e explicativa, verificando se estão de acordo, com as metas definidas no RGQ-SMP e mostrando como está a qualidade de operação das operadoras, por meio dos indicadores de taxa de conexão e desconexão de dados e voz. De acordo com a ANATEL desde 2013 a agência vem fiscalizando a maioria dos municípios, não restringindo a fiscalização apenas por CNs e UFs [53].

4.2.1 Resultados da pesquisa

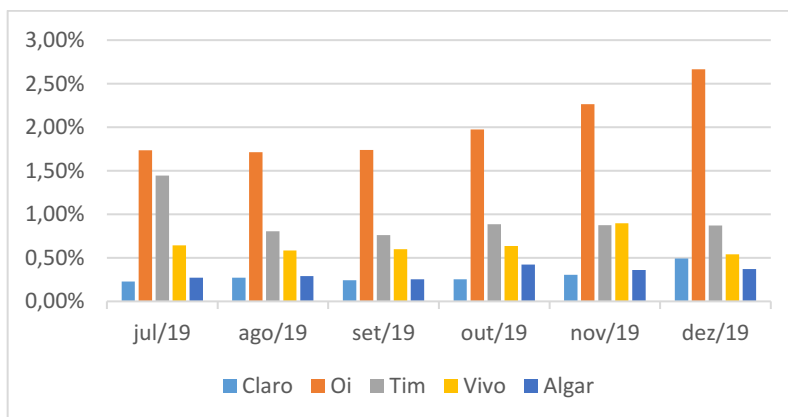
Por meio do sistema online ANATEL – Serviço Móvel, consegue-se coletar informações necessárias para realizar a análise de alguns indicadores. A seguir será vista a análise [54].

Gráfico 4.6 – Taxa de Conexão de Dados (2G,3G,4G) em Lagoa Formosa.



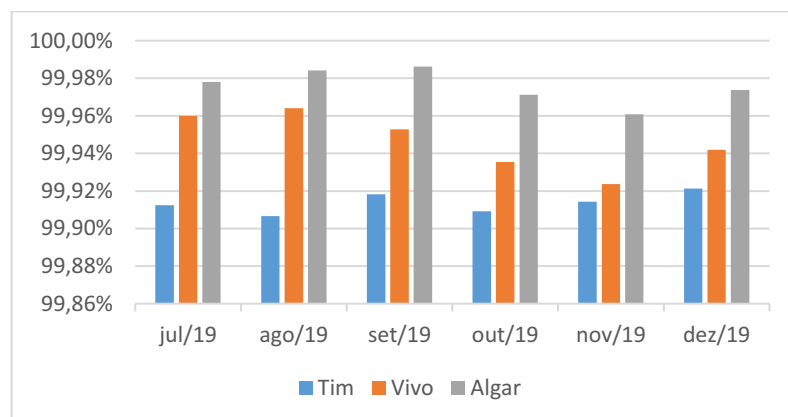
Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Gráfico 4.7 – Taxa de Desconexão de Dados (2G,3G,4G) em Lagoa Formosa.



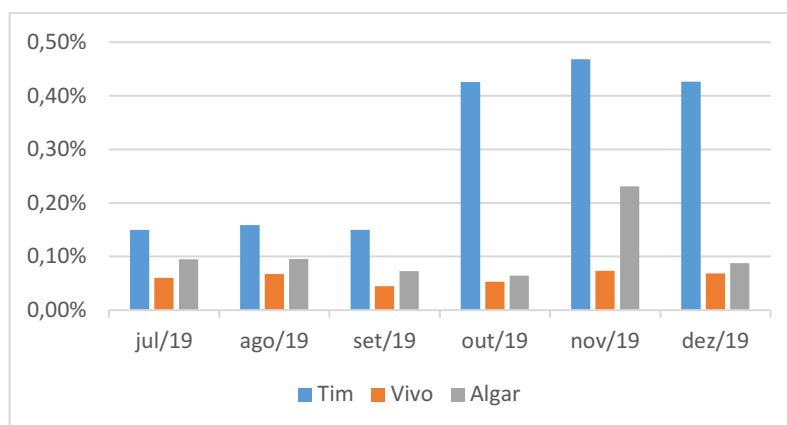
Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Gráfico 4.8 – Taxa de Conexão de Dados (4G) em Lagoa Formosa.



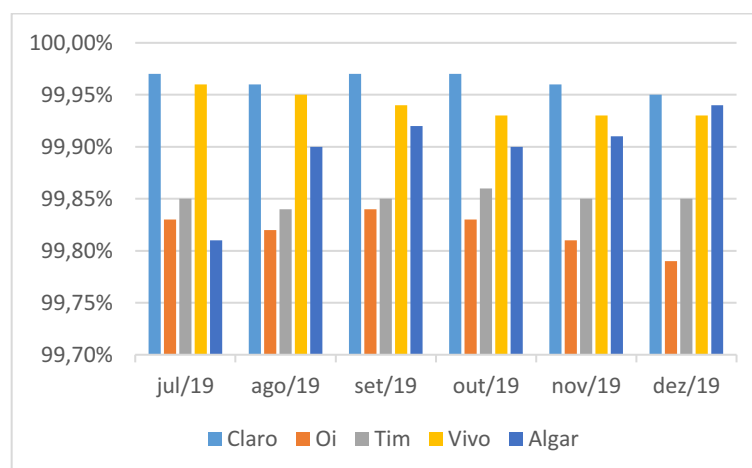
Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Gráfico 4.9 – Taxa de Desconexão de Dados (4G) em Lagoa Formosa.



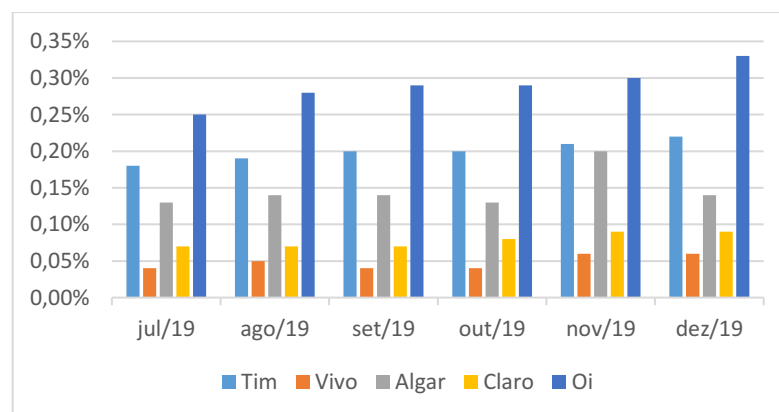
Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Gráfico 4.10 – Taxa de Conexão de Dados (4G) – UF MG.



Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Gráfico 4.11 – Taxa de Desconexão de Dados (4G) – UF MG.

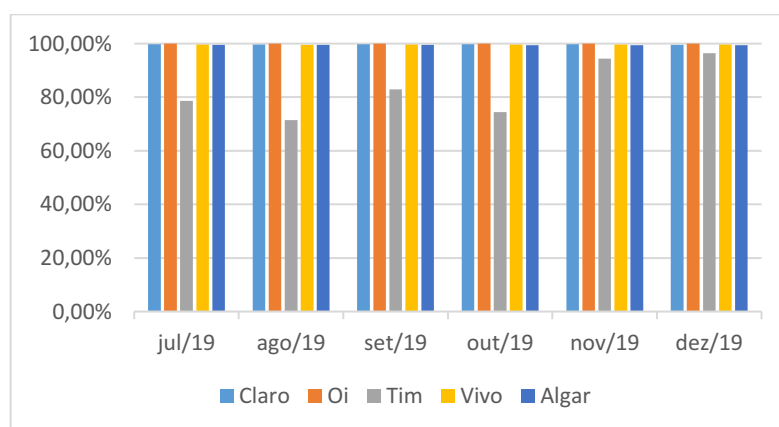


Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Como observa-se no Gráfico 4.6, quando se trata do conjunto de conexão de dados (2G, 3G e 4G), a operadora Oi encerrou o ano de 2019, como sendo a melhor, enquanto a Claro possui menor taxa de conexão. Todas operadoras encerram o ano dentro da margem maior igual que 98%, mas é possível perceber que a TIM, nos meses de julho a outubro sempre esteve fora da norma. O interessante é que, quando analisamos o Gráfico 4.7, a Oi também encerra o ano como sendo a operadora que possui uma maior taxa de desconexão, enquanto a Algar é a líder com uma menor taxa de desconexão. Quando se analisa os Gráficos 4.8 e 4.9, afunilamos os dados de conexão e desconexão somente para o 4G, em Lagoa Formosa, todas operadoras estão cumprindo corretamente o regulamento, Algar como sendo a melhor de conexão e TIM como sendo a pior, mas com um valor bem baixo também. Ao analisar o 4G, como um todo nos estado de Minas Gerais, por meio dos Gráficos 4.10 e 4.11, todas operadoras apresentaram bons resultados, Claro com a melhor conexão e Vivo com a menor desconexão de dados.

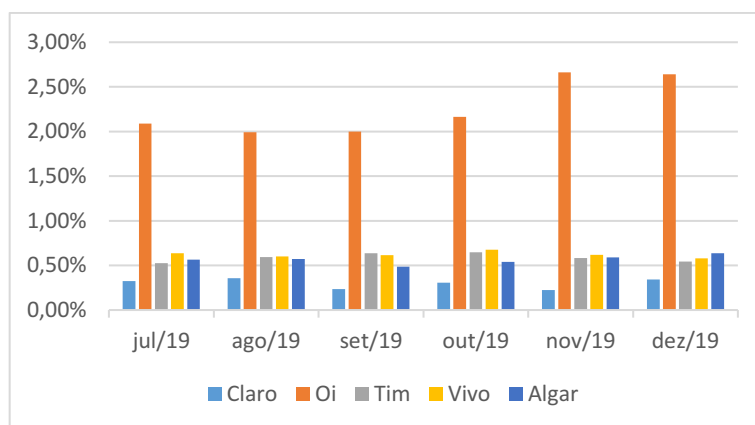
Quando se trata de VOZ, no Gráfico 4.12, observa-se que a TIM não vem com bons resultados quando se trata completamente de chamadas, deixando muito a desejar, com relação a outras operadoras, a melhor nesse quesito, é a Oi. No Gráfico 4.12, percebemos que a Oi ultrapassa o limite de quedas de chamadas, não cumprindo com a regulamentação, e que a Claro é a operadora com menor quedas.

Gráfico 4.12 – Taxa de Conexão de Voz em Lagoa Formosa.



Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

Gráfico 4.13 – Taxa de Desconexão de Voz em Lagoa Formosa.



Fonte: adaptado da aplicação Anatel – Serviço Móvel.

4.3 Conclusão dos resultados

Nesta seção será feita uma análise geral de todos os resultados obtidos em todas as seções descritas, até aqui.

4.3.1 Análise geral

Foi possível estudar as gerações de redes móveis que fizeram e fazem parte do nosso dia a dia, abordando uma metodologia que parte de recomendações da ANATEL para medições em campo do nível de sinal recebido e cumprimento de leis por parte das operadoras de telefonia móvel, bem como cálculos teóricos de predição do sinal. Verificou-se como estavam alguns indicadores de qualidade do SMP das operadoras, fazendo uma comparação de qual melhor atende a região. O alto desempenho, nos indicadores e sinais recebidos na região são determinantes, na hora de escolher um chip para compra. As operadoras vêm cada vez mais tentando se adequar as necessidades do cliente, visto que a concorrência e alta competitividade são grandes.

Os valores calculados na predição representam o nível teórico máximo de cobertura, e por meio desses resultados é possível utilizá-los para design, planejamento e para preparação do gerenciamento de recursos sem fio de alto desempenho, permitindo ao projetista ou operador de rede investigar situações na área que podem implicar na degradação do serviço. Alguns fatores influenciam na força e qualidade do sinal como: sinais concorrentes, barreiras físicas, clima, altura da antena, carga, proximidade do móvel da torre celular, congestionamento da rede, interferência, frequência, modulações, entre outros fatores. Então por meio de cálculos, que é uma estimativa do sinal, pode-se ajustar estes fatores após realizar medidas em campo, para uma predição mais coerente com a região a ser estudada. Devido essa certa diferença entre o teórico e o calculado, será necessário realizar uma calibração dos resultados em trabalhos futuros, avaliando o comportamento do sinal na região e diminuindo o erro entre valores estimados e medidos.

Capítulo 5 – Conclusões, contribuições e trabalhos futuros

Como percebe-se, a telefonia móvel celular sofreu grandes avanços, e está presente, em nossas vidas. A cada dia está se expandindo mais, possibilitando e tornando viáveis vários tipos de aplicações. Nesse trabalho, foram apresentadas as 4 Gerações de Redes Móveis que já operaram e estão em operação, bem como a Quinta Geração (5G), ainda em fase de estudos e testes. Alguns serviços ficaram marcados em cada Geração, a 1G disponibilizou voz analógica, a 2G voz digital e mensagens de textos, a 3G integração de voz digital e internet móvel viáveis, a 4G alta capacidade de dados multimídia e a 5G unificando todos os serviços ofertados antes, mas com aplicações inovadoras como Internet das Coisas, Internet tátil, entre outras. Percebe-se também que a cada geração, os valores como taxas de *downlink* e *uplink* aumentaram significativamente, sendo possíveis inúmeras aplicações.

Então, é de extrema importância para um Engenheiro de Telecomunicações estar por dentro dessa vasta área de estudo que é a comunicação móvel, saber os vários conceitos, e principais características, contribuindo não só para nossa formação, mas para a vida pessoal. Também é muito importante saber sobre as leis que regem a telefonia móvel, os direitos e deveres, bem como os das prestadoras, para se ter em mente o que é legal e ilegal por parte de ambos.

Uma maneira de acompanhar se as prestadoras estão conseguindo transmitir um sinal conforme previsto pelas leis da ANATEL é com o uso de softwares, e a partir disso, fazer estudos e comparações com resultados obtidos, podendo realizar um estudo mais aprofundado para possíveis novas medidas e melhoria na rede de telecomunicações. É possível fazer a predição, embora os valores preditos sejam bem diferentes dos encontrados na prática. Por isso os modelos de predição só são utilizados na fase de projeto. Na prática o que é feito é o drive teste e as correções são feitas baseadas no valor encontrado na prática.

A ANATEL e as operadoras estão cientes dos problemas e metas existentes, que muitas vezes, não são alcançadas, e então cabe a agência acompanhar, controlar e fiscalizar o que está sendo colocado em prática. O não cumprimento de metas pode ocasionar multas, para as operadoras, então, na maioria dos casos elas tentam se adequar às normas estabelecidas, mas em alguns casos, nem sempre é possível

cumprir no prazo estabelecido ou até mesmo a prestadora prefere pagar uma multa, do que realizar grandes mudanças e instalações, na sua infraestrutura.

Em mente, há algumas propostas para um trabalho futuro, como ajustar o algum modelo matemático para que não ocorra tanta diferença nos cálculos dos modelos de predição em relação as medições em campo e dar um maior foco no 5G, pois ainda está em fase de testes e estudos. A proposta para o 5G, é realizar uma pesquisa visando alguma especificação sobre o sinal recebido, qual será o limiar aceito por parte dos grupos que estão estudando o padrão a ser implantado. Com isso será possível fazer os testes da força do sinal recebido em várias regiões especificadas. Esses testes podem ser laboratoriais ou se a tecnologia estiver implantada no Brasil, realizar testes de campo, sendo possível fazer as análises necessárias, para enquadrar ou até mesmo criar algum modelo de propagação.

REFERÊNCIAS

- [1] Telefonia Móvel - Municípios atendidos. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2310-brasil-registra-228-64-milhoes-de-linhas-moveis-ativas-em-maio-de-2019>>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [2] LTE: Evolução das Redes Móveis. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_2.asp>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [3] ONU estabelece 2020 como prazo para adoção de tecnologia móvel 5G. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/onu-estabelece-2020-como-prazo-para-chegada-de-tecnologia-movel-5g/> >. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [4] Telefonia Móvel- Municípios atendidos. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/setorregulado/telefonia-movel-universalizacao>>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [5] Geração de sistemas celulares e tecnologias emergentes. Disponível em <<http://www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/ComunicacoesMoveis1/Cap%C2%A1tulo5-%20Com%20Moveis%20tecnologo%202009-1.pdf>>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [6] SANTOS, Ricardo Di L. Santos REDES GSM, GPRS, EDGE E UMTS. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/ricardo/1_2.html>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [7] Banda para Telefonia Celular: 850MHz e o sistema AMPS. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/pagina_3.asp>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [8] RAPPAPORT, THEODORES. Comunicações sem fio: princípios e práticas. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [9] História das Telecomunicações Disponível em: <<http://museudastelecomunicacoes.org.br/historia-das-telecomunicacoes/>>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [10] Banda para Telefonia Celular: Bandas de 900, 1800, 1900 e 2100 MHz. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/pagina_5.asp>. Acesso em: 04 de Março de 2020.
- [11] Introdução aos Sistemas de Comunicação Celular. Disponível em <http://www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/ComunicacoesMoveis1/Cap1_IntroducaoComCelular_v3.pdf>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[12] GSM. Disponível em <http://www.logicengenharia.com.br/mcamara/alunos/GSM.pdf>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[13] Redes, Guia Prático 2ª Ed. (Atualização). Disponível em <http://www.hardware.com.br/livros/redes/gsm.html>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[14] Rede GSM I: Padrão GSM. Disponível em http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialalambcel1/pagina_3.asp. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[15] UMTS (3GSM) e HSDPA. Disponível em <http://www.hardware.com.br/livros/redes/umts-3gsm-hsdpa.html>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[16] Tecnologias 2G e 2,5G: TDMA, CDMA, GSM, GPRS e EDGE. Disponível em <https://www.infowester.com/2g.php>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[17] Introdução aos Sistemas de Comunicação Celular. Disponível em http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:_XdLnEEv_b8J:www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/ComunicacoesMoveis1/Cap1_IntroducaoComCelular_v3.doc+&cd=3&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br >. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[18] MORIMOTO E. Carlos. Redes, Guia Prático 2ª Ed. Disponível em <http://www.hardware.com.br/livros/redes/gsm.html>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[19] Enhanced Data rates for GSM Evolution. Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_Data_Rates_for_GSM_Evolution. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[20] SANTOS, Josué. Sistemas de redes 3g/4g offload. Disponível em <http://tcconline.utp.br/media/tcc/2015/10/SISTEMAS-DE-REDES-3G4G-OFFLOAD.pdf>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[21] MORIMOTO E. Carlos. GPRS, EDGE, HSDPA e HSUPA: Entendendo as tecnologias. Disponível em <http://www.hardware.com.br/dicas/gprs-edge.html>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[22] COMER, Douglas E. Redes de Computadores e Internet – 4.ed. Editora Bookman.

[23] ALECRIM, Emerson. Tecnologias 3G e 4G: CDMA-2000, UMTS, HSPA, HSPA+ e LTE. Disponível em <https://www.infowester.com/3g4g.php>. Acesso em: 04 de Março de 2020.

[24] HSPA. Disponível em <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[25] GUEDES, Luis; VASCONCELOS, Renan. A família HSPA. Disponível em <https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/hspa.html>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[26] HSUPA. Disponível em <[https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/marden/HSUPA\(HighSpeedUplinkPacketAccess\).html](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/marden/HSUPA(HighSpeedUplinkPacketAccess).html)>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[27] Evolved High Speed Packet Access. Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Evolved_High_Speed_Packet_Access>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[28] O sistema LTE. Disponível em <https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/lte.html>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[29] LTE. Disponível em <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[30] GUEDES, Luis; VASCONCELOS, Renan. O sistema LTE. Disponível em <https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/lte.html>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[31] Conceitos Básicos de LTE / LTE-Advanced. Disponível em <https://www.rohde-schwarz.com/br/tecnologias/celular/lte/tecnologia-lte/informacoes-sobre-lte_52292.html>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[32] GUEDES, Luis; VASCONCELOS, Renan. LTE-Advanced. Disponível em <https://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/lte_advanced.html>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[33] Redes de Comunicações Móveis de 5ª Geração. Disponível em <http://www.fapemig.br/arquivos/site/sala-de-imprensa/arquivos/curso-final-versao-6-08-06-2016_com-apresentacao-crr-5g.pdf>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[34] Associações do Brasil e da Europa assinam Memorando para desenvolvimento do 5G. Disponível em <<http://www.telebrasil.org.br/sala-de-imprensa/releases/8202-associacoes-do-brasil-e-da-europa-assinam-memorando-para-desenvolvimento-do-5g>>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[35] A 5ª geração de rede sem fio. Disponível em <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2015_2/5G/>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[36] RODRIGUES, JONATHAN. Fundamentals Of 5g Mobile Networks. 1ª ed. John Wiley & Sons Inc, 2015.

[37] UIT prepara terreno para a chegada da Internet Tátil. Disponível em <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/uit-prepara-terreno-para-a-chegada-da-internet-tatil/>>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[38] 5G: Tecnologias de Celular. Disponível em <http://www.teleco.com.br/5g_tecnologia.asp>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[39] Saiba quais são as frequências das operadoras Brasileiras de telefonia móvel. Disponível em < <https://www.showmetech.com.br/saiba-quais-sao-as-frequencias-das-operadoras-brasileiras-gsmgprsedg-e-hsdpa-3g/>>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[40] KREHER, R., Gaenger, K., LTE Signaling – Troubleshooting & Optimization. First Edition. John Wiley and Sons, 2011.

[41] LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement. Disponível em < <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsrq-measurement-lte/>>. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[42] ROLIN, Evandro Cherubini. Análise da qualidade e do desempenho da cobertura celular long term evolution em Curitiba, Paraná. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do paraná, 2014.

[43] AFROZ, Farhana et al. SINR, RSRP, RSSI and RSRQ measurements in long term evolution networks. International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2015.

[44] LEE, W.C.Y, Mobile Cellular Telecommunications Systems. First Edition. Editora: MC Grall-Hill.

[45] PEREIRA, M. A. B. Análise de Modelos de Propagação na Área Urbana da Região de Curitiba - PR na Faixa de Frequência de 1800 MHz. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Agosto 2007.

[46] PATRIOTA, G. D. Modelo de propagação outdoor para região urbana densa na cidade de Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Agosto 2011.

[47] Wesolowski, K. Mobile Communication Systems. Poznari University of Technology, Poland. JOHN WILEY & SONS, LTDA

[48] Modelos de Predição de Cobertura. Disponível em < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/7623/7623_5.PDF >. Acesso em: 08 de Março de 2020.

[49] ANATEL. Resolução nº 477, de 7 de agosto de 2007. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/22-2007/9-resolucao-477?numeroPublicacao=287052>>. Acesso em: 09 de Março de 2020.

[50] ANATEL. Resolução nº 575, de 28 de outubro de 2011. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2011/68-resolucao-575>>. Acesso em: 09 de Março de 2020.

[51] ANATEL. Portaria nº 209, de 25 de fevereiro de 2016. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/procedimentos-de-fiscalizacao/920-portaria-209#item5.2>>. Acesso em: 09 de Março de 2020.

[52] Indicadores de Qualidade do Serviço de Telefonia Móvel (SMP). Disponível em <<https://www.anatel.gov.br/dados/index.php/controle-de-qualidade?layout=edit&id=300>>. Acesso em: 09 de Março de 2020.

[53] Qualidade - Telefonia Móvel. Disponível em <<https://www.anatel.gov.br/dados/controle-de-qualidade/controle-telefonia-movel#Pesquisa>>. Acesso em: 09 de Março de 2020.

[54] Aplicação Anatel – Serviço Móvel. Disponível em <[http://gatewaysiec.anatel.gov.br/mobileanatel/?nomeCanal=Telefonia%20M%F3vel&codigoVisao=\\$visao.codigo&site=\\$visao.tipoSite.codigo](http://gatewaysiec.anatel.gov.br/mobileanatel/?nomeCanal=Telefonia%20M%F3vel&codigoVisao=$visao.codigo&site=$visao.tipoSite.codigo)>. Acesso em: 09 de Março de 2020.

[55] ANATEL. Portal Institucional. Aplicação Mosaico Disponível em: <http://sistemas.anatel.gov.br/se/public/cmap.php>. Acesso em: 09 de março de 2020.

[56] Avaliando previsões com o R. Disponível em: <https://analisemacro.com.br/econohttps://analisemacro.com.br/economia/macroeconometria/avaliando-previsoes-com-o-r/mia/macroeconometria/avaliando-previsoes-com-o-r/> . Acesso em: 10 de julho de 2020.

[57] ANATEL – Recuperação de frequências: Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/stel/Consultas/RecuperacaoFrequencias/tela.asp?SISQSmodulo=9896>. Acesso em: 10 de julho de 2020.

[58] Arquivos das medições realizadas em Lagoa Formosa : https://drive.google.com/file/d/1q9_LD_IYkB9VSzQuBwasSzFHH_-hCrJ0/view?usp=sharing