INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

JHONATAN CONSTANTINO

Redes 5G: predição e avaliação de área de cobertura outdoor

São José - SC

maio/2023

REDES 5G: PREDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE ÁREA DE COBERTURA OUTDOOR

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Mario de Noronha Neto, Dr.

Coorientador: Glauco de Castro Ligeiro, Eng.

São José - SC

maio/2023

Jhonatan Constantino

Redes 5G: predição e avaliação de área de cobertura outdoor

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 15 de dezembro de 2023:

Prof. Mario de Noronha Neto, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Rubem Toledo Bergamo, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Fábio Alexandre de Souza, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus. Agradeço também ao meu orientador Mario de Noronha Neto pelo auxílio na orientação do trabalho de conclusão de curso. Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia de Telecomunicações da Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus São José pela excelente qualidade técnica e didática de cada um. A minha família que sempre me apoiou e nos estudos e foi muito importante para a finalização do curso. A equipe da BW Tech que proporcionou a realização desse trabalho através da disponibilização do software, base de mapas e tempo de dedicação para explicar a ferramenta.

Sempre que te perguntarem se podes fazer um trabalho,
respondas que sim e te ponhas em seguida a aprender como se faz.
T. Roosevelt

RESUMO

No cotidiano seja no trabalho, estudo ou lazer surge a demanda de troca de informações e conectividade. Nos dispositivos móveis que utilizam a tecnologia 4G é enfrentado a necessidade de maiores taxas de transferência de dados e de capacidade na quantidade de usuários, decorrente da diminuição da qualidade de sinal por fatores do caminho até a estação rádio base, que afetam de maneira significativa como a distância e obstáculos no percurso. No planejamento de redes móveis são realizados cálculos para que as condições de cobertura e propagação de sinal como a modulação sejam mantidos favoráveis para uma ótima experiência ao usuário. Na quinta geração de redes móveis ou 5G são atingidos os objetivos que compõem as necessidades do 4G, através de melhorias da tecnologia que conseguimos perceber em um estudo de predição de cobertura de sinal. Estas predições são calculadas por softwares de simulação que utilizam dados geográficos, dados físicos dos equipamentos utilizados e modelos de propagação de sinal existentes como parâmetros, permitindo a visualização dos níveis de qualidade de sinal por meio de mapas. É elaborado neste trabalho um projeto de planejamento de redes celulares outdoor na cidade Florianópolis utilizando o software Atoll (FORSK, 2023) de simulação de redes móveis 5G.

Palavras-chave: 5G. LTE. Cobertura. Predição. Propagação.

ABSTRACT

In everyday life, whether at work, study or leisure, there is a demand for information exchange and connectivity. In mobile devices that use 4G technology, the need for higher data download rates and capacity in the number of users is faced, due to the decrease in signal quality due to factors on the way to the base station, which produced significantly as the distance and obstacles on the route. In network planning, they are carried out by observing that the mobile coverage and expressive signal conditions such as modulation are met for an optimal user experience. In the fifth generation of mobile networks or 5G, the objectives that make up the needs of 4G are achieved, through technology improvements that we were able to perceive in a signal coverage prediction study. These predictions are infinite by simulation software that uses geographic data, physical data of the equipment used and existing signal control models as parameters, allowing the visualization of signal quality levels through maps. In this work, an outdoor cellular network planning project in the city of Florianópolis is elaborated using the Atoll (FORSK, 2023) software for simulating 5G mobile networks.

Keywords: 5G. LTE. Coverage. Prediction. Propagation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cenários de uso do 5G 17
Figura 2 – Tela inicial do Atoll 25
Figura 3 – Coordenadas geodésicas 25
Figura 4 – Zonas UTM 26
Figura 5 – Projeção de mapa utilizada no projeto 27
Figura 6 – Mapa do projeto 27
Figura 7 – Informações de backhaul do site 28
Figura 8 – Informações gerais do transmissor 28
Figura 9 – Informações do transmissor 30
Figura 10 – Informações da célula 5G do transmissor 30
Figura 11 – Informações do modelo de propagação do transmissor 31
Figura 12 – Informações do modelo de propagação do transmissor 31
Figura 13 – Nível de sinal de downlink 35
Figura 14 – Legenda do nível de sinal de downlink 35
Figura 15 – Nível de sinal de downlink no Earth 36
Figura 16 – Nível de sinal de downlink com modelo de propagação de Cost-Hata . . 37
Figura 17 – Nível de sinal RSRP de uplink 37
Figura 18 – Legenda do nível de sinal RSRP de uplink 37
Figura 19 – Nível de sinal de uplink no Earth 38
Figura 20 – Melhor servidor com sobreposição 39
Figura 21 – Legenda do melhor servidor com sobreposição 39
Figura 22 – Melhor servidor sem sobreposição 40
Figura 23 – Legenda do melhor servidor sem sobreposição 40
Figura 24 – Melhor servidor sem sobreposição no Earth 40
Figura 25 – Capacidade de downlink 41
Figura 26 – Legenda da capacidade de downlink 42
Figura 27 – Capacidade de downlink no Google Earth 42
Figura 28 – Capacidade de uplink 43
Figura 29 – Legenda da capacidade de uplink 43
Figura 30 – Capacidade de uplink no Google Earth 43
Figura 31 – Ordem de modulação de downlink 44
Figura 32 – Legenda da ordem de modulação de downlink 45
Figura 33 – Ordem de modulação de downlink no Google Earth 45
Figura 34 – Ordem de modulação de uplink 46
Figura 35 – Legenda da ordem de modulação de uplink 46

Figura 36 – Ordem de modulação de uplink no Google Earth 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências do 5G entre 410 MHz e 7125 MHz 19
Tabela 2 – Frequências do 5G entre 24250 MHz e 71000 MHz 20
Tabela 3 – Possíveis valores para as constantes 33
Tabela 4 – Valores para K1 de acordo com a frequência 33
Tabela 5 – Perdas por classe clutter 34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações.

AWGN Additive White Gaussian Noise.

CSI Channel State Information.

EIRP Effective Isotropic Radiated Power.

EMBB Enhanced Mobile Broadband.

ENB Evolved Node B.

FDD Frequency Division Duplex.

GNB Next Generation Node B.

GPS Global Positioning System.

GSM *Global System for Mobile Communications*.

IoT Internet of Things.

ITU Internation Telecommunication Union.

LTE Long Term Evolution.

MIMO Multiple Input Multiple Output.

MMTC Massive Machine Type Communications.

NGA National Geospatial-Intelligence Agency.

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

PL Path Loss.

RF Rádio Frequência.

RSRP Reference Signal Received Power.

RSRQ Reference Signal Received Quality.

RSSI Received Signal Strength Indicator.

SDL Supplementary Downlink.

SUL Supplementary Uplink.

TDD Time Division Duplex.

UE User Equipment.

UHF Ultra High Frequency.

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System.*

URLL Ultra Reliable Low Latency Communications.

UTM Universal Transverse Mercator.

VHF Very High Frequency.

WGS84 World Geodetic System 1984.

WiFi *Wireless Fidelity.*

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 14
1.1 Objetivo geral . . . 15
1.2 Objetivos específicos . . . 15

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . 16
2.1 Sobre o 5G . . . 16
2.1.1 Cenários de uso do 5G . . . 16
2.2 Espectro de frequências . . . 17
2.3 Técnicas de diversidade . . . 18
2.3.1 MIMO . . . 20
2.3.2 Beamforming . . . 20
2.4 Modelos de propagação . . . 21
2.4.1 Modelo Okumura-Hata . . . 22
2.4.2 Modelo COST-231 Hata . . . 22

3 DESENVOLVIMENTO . . . 24
3.1 Software . . . 24
3.2 Criando o projeto . . . 24
3.3 Coordenadas . . . 25
3.4 Base de dados . . . 26
3.5 Posicionamento da torre . . . 27
3.6 Modelo de propagação . . . 29
3.7 Simulação . . . 34
3.7.1 Nível de sinal . . . 35
3.7.2 Melhor servidor . . . 38
3.7.3 Capacidade . . . 41
3.7.4 Qualidade . . . 44
3.8 Otimização . . . 46

4 CONCLUSÃO . . . 49

REFERÊNCIAS . . . 51

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia 4G Long Term Evolution (LTE) permite a comunicação entre pessoas e a comunicação entre coisas, porém os valores de taxa de transmissão de dados estão limitados com a taxa de pico de transferência experimentada em 1 Gbps, a capacidade de tráfego por área de 100 kbps/m^2 e a latência fim a fim de aproximadamente 20 ms (ALBERTI et al., 2021). Esses valores são favoráveis a uma boa experiência ao usuário, porém com o aumento da demanda de tráfego para diferentes cenários, que exigem uma comunicação de alta confiança nos dados em tempo mínimo de requisição e resposta, teve a necessidade de uma nova tecnologia que atende aos requisitos exigidos.

O 5G tem a premissa de atuar nos seguintes cenários: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Massive Machine Type Communications (mMTC) e Ultra Reliable Low Latency Communications (uRLL) (OSSEIRAN, 2020). Estes cenários oferecem valores altos de taxa de transferência de dados, alta capacidade de tráfego por área e quantidade de dispositivos e baixos valores de latência com uma alta confiabilidade nos dados. Estas características tornam o 5G, a tecnologia ideal para aplicações típicas de uso em dispositivos móveis de uso pessoal e telemetria através de sensores.

As redes móveis celulares são estruturadas através de torres com estações de rádio, para cobrir uma determinada área com o sinal de rádio frequência por onde são transmitidos os dados. Estes sinais enfrentam adversidades por condições do meio de transmissão entre a estação e o dispositivo móvel. São encontrados obstáculos pelo percurso como edifícios, vegetação ou objetos refletores que atenuam a intensidade do sinal piorando ou contribuindo com a recepção dos dados.

A qualidade do sinal na recepção dos dispositivos é o principal objetivo de um planejamento de redes móveis. No estudo de predição de cobertura são calculados os diferentes caminhos do sinal transmitido da estação rádio base, também chamada de Evolved Node B (eNB) no 4G ou de Next Generation Node B (gNB) no 5G. Os importantes resultados destes cálculos são as ordens de modulação, nível de intensidade de sinal recebido, potência recebida do sinal de referência e a relação entre sinal e ruído.

Existem equações para alcançar os resultados em pontos estratégicos, no qual os obstáculos estão em diferentes cenários naturais ou criados pelo homem. Também chamadas de modelos de propagação de sinal, são específicos para regiões rurais, semi urbanas, urbanas ou em ambientes internos. O mercado utiliza *software* de simulação com parâmetros como dados geográficos e dados de antenas de transmissão e recepção, obtendo um mapa de cobertura ponto área com informações importantes para o planejamento de rádio frequência de uma rede celular.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver e analisar um planejamento de predição de cobertura de sinal 5G em uma área outdoor da cidade de Florianópolis utilizando o *software* de simulação Atoll.

1.2 Objetivos específicos

- Apresentar modelos teóricos de propagação de sinal.
- Comparar modelos teóricos de redes 4G com os modelos teóricos de redes 5G.
- Apresentar indicadores de nível de sinal e de performance calculados na predição
- Apresentar aspectos da ferramenta Atoll.
- Analisar os resultados e parâmetros utilizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Será realizado um planejamento de redes celulares outdoor utilizando o 5G como tecnologia de transmissão de redes móveis e o software Atoll como ferramenta para simular e calcular os valores que determinam a qualidade de um projeto de redes móveis como Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Received Quality (RSRQ), Received Signal Strength Indicator (RSSI) e modulação. A fase inicial do projeto é composta por compor o embasamento teórico da tecnologia 5G em um planejamento outdoor e por fim simular um cenário no software, afim de obter os resultados de qualidade da cobertura e analisá-los.

2.1 Sobre o 5G

Com o crescimento da quantidade de dispositivos comunicando simultaneamente, surgiu a necessidade de uma tecnologia que consiga manter uma conexão com qualidade para o usuário final. Ou seja, com uma alta taxa de transferência de dados, com baixa latência suportando muitos dispositivos por m^2.

As limitações de desempenho do 4G foram as motivações da indústria para aplicar esforço e investimento no desenvolvimento de uma nova geração da tecnologia de redes móveis. O 5G tem como principais requisitos e cenários de uso a banda larga móvel aprimorada eMBB, comunicações ultra confiáveis de baixa latência uRLL e comunicações de tipo de máquina massiva mMTC.

2.1.1 Cenários de uso do 5G

eMBB tem como principal alvo, o intuito de entregar altos volumes de dados com uma taxa de transferência extremamente alta. Como por exemplo, realidade aumentada, presença remota, streaming de vídeo de altíssima resolução, imagens 3D e robôs colaborativos (AHMADI, 2019). Estarão presentes em ambientes urbanos densamente povoados, ambientes internos como prédios ou shoppings e eventos com grandes multidões, como shows ou eventos esportivos. Tem como requisitos de desempenho pelo Internation Telecommunication Union (ITU) para este cenário taxas de dados pelo usuário de 100 Mbps em áreas urbanas e suburbanas e de 1 Gbps em hotspots com uma taxa de pico de 20 Gbps (ALBERTI et al., 2021).

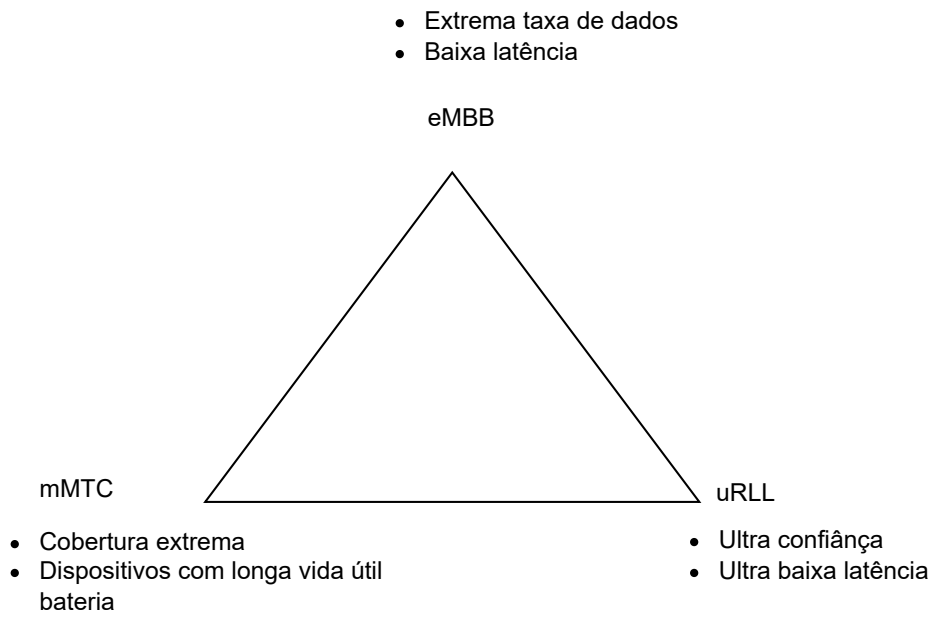
mMTC foca em prover conexão para uma quantidade massiva de dispositivos que estão constantemente enviando e recebendo dados. Está presente principalmente nos cenários que envolvem a Internet das Coisas (Internet of Things (IoT)), viabilizando o

aumento da densidade de dispositivos por área e aumento na eficiência energética. É previsto que o número de terminais IoT conectados à rede 5G chegue a 1 trilhão de terminais alcançando até 10^6 dispositivos/km² (ALBERTI et al., 2021).

uRLL enfatiza na necessidade de uma comunicação ultra confiável nos dados com baixa latência, permitindo a atuação em cenários críticos, entregando os pacotes de dados dentro de um limite de tempo com a maior probabilidade de sucesso. Alguns exemplos são aplicações de infraestrutura e de controle de indústria. Os requisitos de desempenho para este caso de uso são de que a latência fim a fim máxima seja de 1 ms e a probabilidade de indisponibilidade menor ou igual a 10^{-7} ou também chamado de sistema de confiabilidade de sete 9s (ALBERTI et al., 2021).

Na Figura 1 conseguimos visualizar os cenários de uso do 5G de forma resumida.

Figura 1 – Cenários de uso do 5G



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 Espectro de frequências

O espectro do 5G é composto por faixas de frequência, que tem papel fundamental para cada cenário de uso proposto pela nova geração da tecnologia de redes móveis. Possui frequências abaixo de 1 GHz, as frequências de 1 a 7 GHz e as acima de 7 GHz, onde estão as ondas milimétricas.

A região das frequências abaixo de 1 GHz estarão destinadas a atender soluções que busquem alta cobertura e dispositivos IoT. Essas frequências não estarão aptas para

um consumo massivo, por conta de suas condições físicas em questão de quantidade de antenas e a distância entre antenas para a implementação do sistema. Quanto menor a frequência, maior o comprimento de onda e portanto, maior a antena.

A faixa de frequência entre 1 GHz e 7 GHz, é a principal faixa de frequência utilizada pelo 5G. Essa faixa de frequência oferece boas opções em questão de cobertura, de desempenho e capacidade, como é obtido no 4G. As faixas de frequência presentes no 5G estão também disponíveis nas gerações anteriores, porém com estratégias de compartilhamento do espectro.

Temos também a faixa de frequência acima de 7 GHz, que será necessária para soluções com 5G que terão uma extrema transferência de dados. Essa é uma região bem interessante para ser explorada, pois há um grande potencial e irá atingir objetivos do 5G em questão de transferência massiva de informações.

Na Tabela 1 segue as informações presentes em 3GPP (2023) sobre algumas das bandas e frequências que serão utilizadas no 5G entre 410 MHz e 7125 MHz. A banda n96 que possui a faixa de frequência de 5925 MHz a 7125 MHz não está presente na Tabela 1 por estarmos considerando somente as bandas sem restrições, por exemplo, a n96 é uma banda aplicável em apenas alguns países ou regiões que a designam para uso de acesso de espectro compartilhado. (3GPP, 2023)

E a Tabela 2 que contém as bandas com frequências entre 24250 MHz e 71000 MHz.

As frequências liberadas para uso pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) no Brasil foram as sub faixas de 708 MHz a 718 MHz, de 763 MHz a 773 MHz, de 2.300 MHz a 2.390 MHz, de 3.300 MHz a 3.700 MHz e de 24,30 GHz a 27,5 GHz. (ANATEL, 2021)

2.3 Técnicas de diversidade

Com o aumento do uso dos espectros de frequência, muitos dispositivos estão simultaneamente com acesso ao meio e trocando informações. Por ser um espaço físico limitado, foram desenvolvidas técnicas que exploram a diversidade com que o sinal se propaga, melhorando a qualidade do sinal na recepção. A técnica de diversidade que vamos explorar a seguir será a espacial, onde aumentamos a quantidade de antenas transmissoras e ou receptoras, obtendo múltiplos caminhos de propagação onde o sinal terá maior probabilidade de qualidade. (RAPPAPORT, 2001)

A diversidade por tempo se refere a transmissão repetida do sinal com espaçamentos de tempo que excedem o tempo de coerência do canal. Dessa forma muitos sinais são recebidos com atenuações diferentes, aumentando a probabilidade de um sinal com maior

Tabela 1 – Frequências do 5G entre 410 MHz e 7125 MHz

Banda	Frequência Uplink	Frequência Downlink	Duplexação
n1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	Frequency Division Duplex (FDD)
n2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
n14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
n18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
n25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
n26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n29	N/A	717 MHz – 728 MHz	Supplementary Downlink (SDL)
n30	2305 MHz – 2315 MHz	2350 MHz – 2360 MHz	FDD
n34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	Time Division Duplex (TDD)
n38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
n39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
n40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
n48	3550 MHz – 3700 MHz	3550 MHz – 3700 MHz	TDD
n50	1432 MHz – 1517 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	TDD
n51	1427 MHz – 1432 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	TDD
n53	2483.5 MHz – 2495 MHz	2483.5 MHz – 2495 MHz	TDD
n65	1920 MHz – 2010 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n67	N/A	738 MHz – 758 MHz	SDL
n70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n74	1427 MHz – 1470 MHz	1475 MHz – 1518 MHz	FDD
n75	N/A	1432 MHz – 1517 MHz	SDL
n76	N/A	1427 MHz – 1432 MHz	SDL
n77	3300 MHz – 4200 MHz	3300 MHz – 4200 MHz	TDD
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz – 5000 MHz	4400 MHz – 5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz – 1785 MHz	N/A	Supplementary Uplink (SUL)
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n85	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
n86	1710 MHz – 1780 MHz	N/A	SUL
n89	824 MHz – 849 MHz	N/A	SUL
n90	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
n100	874.4 MHz – 880 MHz	919.4 MHz – 925 MHz	FDD
n101	1900 MHz – 1910 MHz	1900 MHz – 1910 MHz	TDD

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Frequências do 5G entre 24250 MHz e 71000 MHz

Banda	Faixa de frequência	Duplexação
n257	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n259	39500 MHz – 43500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	TDD
n262	47200 MHz – 48200 MHz	TDD
n263	57000 MHz – 71000 MHz	TDD

Fonte: Elaborada pelo autor.

qualidade. (RAPPAPORT, 2001)

É possível também aumentar a diversidade através da transmissão de informação em mais de uma frequência de portadora, explorando atenuações diferentes. As técnicas de modulação Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) proporcionaram o uso eficiente do espectro e taxas de transmissão elevadas através da diversidade em frequência com codificação de controle de erro em grande largura de banda. (RAPPAPORT, 2001)

2.3.1 MIMO

A estratégia de utilizar várias antenas de transmissão e recepção para aumentar a vazão por célula, capacidade de usuários e também a qualidade do sistema sem fio é chamada de Multiple Input Multiple Output (MIMO). O processamento de sinais chegando por diferentes antenas de recepção aumenta a qualidade do enlace de rádio frequência e robustez pela otimização do sistema irradiante. As técnicas MIMO são utilizadas para obtenção de multiplexação espacial, e beamforming.

A multiplexação espacial se trata de uma técnica onde um fluxo de informação é divido e transmitido em pequenos fluxos. Os pequenos fluxos são transmitidos e recebidos por diferentes antenas, explorando a diversidade espacial. (ROCHOL, 2018)

2.3.2 Beamforming

Uma tecnologia considerada como uma das chaves fundamentais para o potencial do 5G é o beamforming, que consiste em formar um feixe direcional do sinal entre o transmissor e o receptor, para que exista um ajuste no ganho e na fase de cada antena proporcionando maior alcance, maior vazão e uma redução na interferência do sistema. Para que isso ocorra é necessário o conhecimento do canal por meio do Channel State Information (CSI), que descreve informações de como o sinal é propagado do transmissor até o receptor. (ROCHOL, 2018)

O 5G comporta o termo *massive MIMO*, pois tem a premissa de utilizar 64 antenas de transmissão e de recepção, aumentando a eficiência das técnicas apresentadas nesta

seção.

2.4 Modelos de propagação

Os sinais elétricos sem fio conseguem alcançar distâncias enormes devido as suas propriedades físicas eletromagnéticas. Porém, sempre que colidem em alguma superfície, sejam ela sólida, líquida ou gasosa, ocorrem modificações em seu caminho. Dentre as alterações que podem ocorrer no sinal sem fio estão:

- Reflexão, na qual o sinal reflete ao encontrar áreas muito maiores que o comprimento de onda do sinal.
- Refração, na qual o sinal muda de direção ao passar através de um meio com densidade diferente do atual.
- Difração, na qual o sinal altera de direção ao atravessar fendas com dimensões de ordem do comprimento de onda do sinal.
- Absorção, na qual o sinal é absorvido totalmente ou parcialmente ao passar por um obstáculo.
- Difusão ou espalhamento do sinal.
- Ruído eletromagnético, principalmente o ruído branco ou Additive White Gaussian Noise (AWGN), ocorrido pelo aumento da temperatura dos componentes incluídos na transmissão e geração do sinal.
- Interferências, geradas por um ou mais sinais atuando na mesma frequência ou próxima do sinal.
- Desvanecimento, é a soma destrutiva dos sinais que chegam por múltiplos percursos ao encontro do receptor.

Durante o planejamento de redes celulares é preciso obter valores de recepção de sinal que coincidam com a realidade. Esses valores são difíceis de calcular, portanto é preciso realizar trabalhos de medição em campo para que possa ter uma quantidade de amostras e ao final uma equação para o cálculo da previsão do valor de intensidade do sinal de recepção, a partir de parâmetros ou variáveis como a distância do ponto de transmissão ao ponto de recepção, movimentação do receptor e obstruções no cenário. Essas equações recebem o nome de modelos de propagação.(RAPPAPORT, 2001)

Os modelos de propagação descritos a seguir são muito utilizados nas redes móveis e possuem adaptações para as redes LTE servindo como base para as redes 5G.

2.4.1 Modelo Okumura-Hata

Entre os modelos desenvolvidos que são mais comuns por serem eficientes estão o Okumura-Hata e o COST-231. Em Tóquio, no ano de 1968, Okumura foi responsável por realizar várias medições para criar um gráfico com as curvas de atenuação entre a estação rádio base e a estação móvel dentro da faixa de Ultra High Frequency (UHF) e Very High Frequency (VHF), em aplicações móvel terrestre.

Em 1980, Hata desenvolveu uma expressão matemática que se aproximava dos dados gráficos do experimento de Okumura. Porém, neste novo modelo foi definido a perda ao longo do caminho ou Path Loss (PL) em um ambiente suburbano em função da distância $d[km]$, frequência $fc[Hz]$, altura $h_b[m]$ da estação rádio base e altura $h_m[m]$ da estação móvel, descrita pela Equação 2.1:

$$PL_{urbano}(dB) = 69,55 + 26,16log(f_c) - 13,82log(h_b) - a(hm) + (44,9 - 6,55log(h_b))log(d) \tag{2.1}$$

Para ambientes suburbanos, foi desenvolvida a expressão descrita na Equação 2.2:

$$PL_{suburbano} = PL_{urbano} - 2[log(f_c/28)]^2 - 5,4 \tag{2.2}$$

Após um refinamento, o modelo também pôde ser aplicado em ambientes rurais através da Equação 2.3:

$$PL_{rural} = PL_{urbano} - 4,78(log(f_c))^2 - 18,33log(f_c) - 40,98 \tag{2.3}$$

Este modelo foi elaborado para as seguinte faixa de valores:

- Frequência da portadora f_c: 0,5 a 1,5 GHz
- Altura h_b da antena da estação rádio base: >30 m
- Altura h_m da antena da estação móvel: 1 a 10 m
- Distância d: 1 a 10 km

2.4.2 Modelo COST-231 Hata

O projeto europeu COST-231 ampliou o modelo Okumura-Hata, criando o modelo COST-231 Hata que também é um dos mais utilizados em sistemas de redes sem fio e sistemas celulares. Houve o incremento do fator c_m e o parâmetro $a(h_m$ em relação ao Okumura-Hata, esses parâmetros são definidos para os ambientes urbanos e suburbanos. A expressão do PL se dá pela Equação 2.4:

$$PL_{urbano}(dB) = 46,3+33,9log(f_c)-13,82log(h_b)-a(hm)+(44,9-6,55log(h_b))log(d)+c_m \tag{2.4}$$

Como dito anteriormente, nesse modelo os parâmetros c_m e $a(h_m)$ podem assumir dois diferentes valores dependendo do ambiente que serão aplicados, para urbano definido pela Equação 2.5 com $c_m = 3dB$:

$$a(h_m) = 3,2(log(11,75h_m))^2 - 4,97) \tag{2.5}$$

E em ambientes suburbanos pela Equação 2.6 com $c_m = 0$:

$$a(h_m) = (1,11log(f_c) - 0,7)h_m - (1,56logf_c - 0,8) \tag{2.6}$$

Este modelo foi elaborado para as seguinte faixa de valores:

- Frequência da portadora f_c: 1,5 a 2 GHz
- Altura h_b da antena da estação rádio base: 30 a 200 m
- Altura h_m da antena da estação móvel: 1 a 10 m
- Distância d: 1 a 20 km

Os modelos de propagação apresentados estão incorporados em softwares de simulação de planejamento de Rádio Frequência (RF), que são considerados ferramentas essenciais para os engenheiros em tarefas como estas.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capitulo, apresentaremos os passos seguidos para o desenvolvimento do projeto desde as etapas iniciais de carregamento do banco de mapas para a realização da simulação até a execução dos cálculos através do software Atoll e análise dos resultados obtidos.

3.1 Software

A simulação da cobertura de redes outdoor 5G foi realizada através do software Atoll da empresa Forsk com sua representante BW Tech, que o disponibilizou como ferramenta para o corpo do trabalho. No desenvolvimento do projeto foi necessário ajustar parâmetros presentes no software para que o estudo de predição alcançasse o melhor resultado. Esses ajustes foram realizados com a ajuda de especialistas da BW Tech que nos acompanharam durante o processo de simulação e entendimento da ferramenta para análise.

A empresa que nos apoiou e possibilitou esse trabalho foi a BW Tech[1] de Belo Horizonte, Minas Gerais. Existente há mais de 15 anos no mercado, possui participação e desenvolvimento de projetos pelo mundo todo focados na área de telecomunicações. No portfólio compõem produtos de monitoramento, gestão e otimizações das principais operadoras de redes móveis do Brasil. Outro ponto importante a ser citado e crucial ao nosso projeto é que a BW Tech é a representante oficial do software Atoll da Forsk no Brasil.

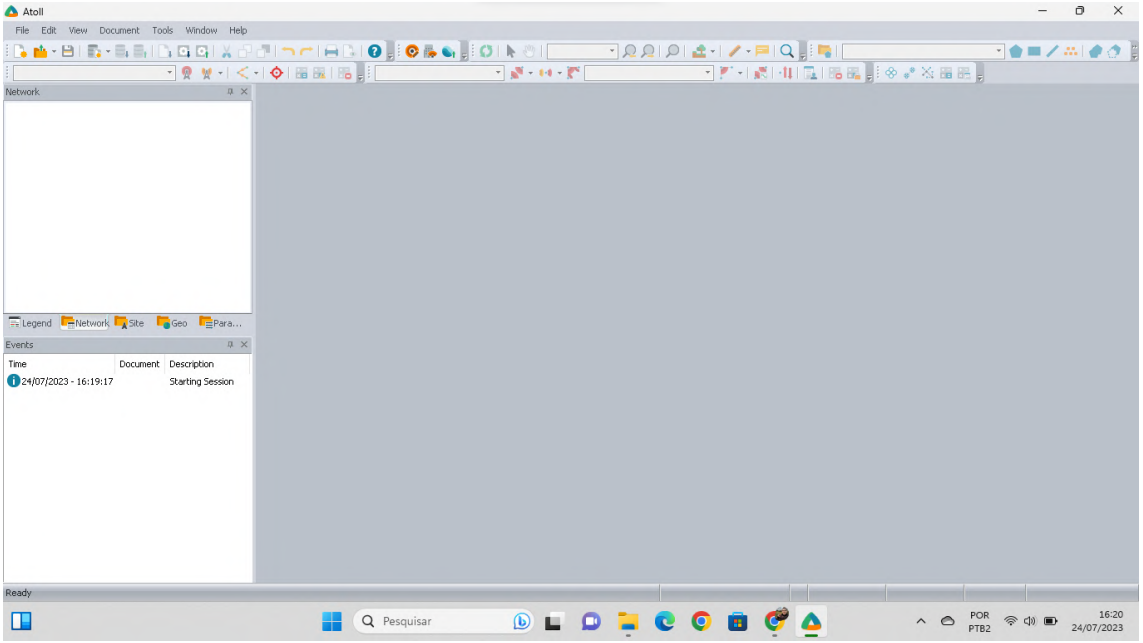
3.2 Criando o projeto

Ao abrir o software vemos a seguinte tela como apresentado na Figura 2. Como podemos observar, temos muitas opções que podem ser exploradas para análise de resultados ou pontos específicos durante o estudo.

Para iniciarmos o projeto, precisamos criar um novo arquivo de projeto e definir como serão apresentados os mapas para sabermos onde posicionar as torres, pontos de recepção e nos localizar. Será detalhado a seguir sobre as coordenadas, que é um passo importante de conhecimento para o começo de uma simulação de cobertura de RF em uma região geográfica.

[1] <https://www.bwtech.com>

Figura 2 – Tela inicial do Atoll



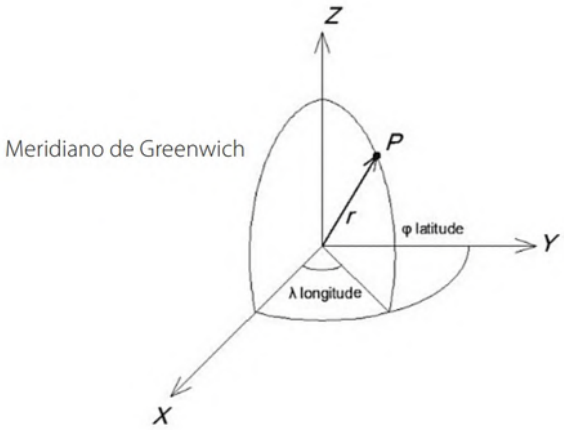
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Coordenadas

As coordenadas importadas no design da predição seguem o padrão World Geodetic System 1984 (WGS84) e Universal Transverse Mercator (UTM).

O WGS84 tem como objetivo indicar a localização de uma posição em relação ao globo terrestre. Esse padrão geodésico[2] é mantido pela National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) dos Estados Unidos da América, e suas coordenadas, com sua precisão, variam ao longo do tempo devido ao movimento contínuo das placas tectônicas (CORREA, 2017).

Figura 3 – Coordenadas geodésicas

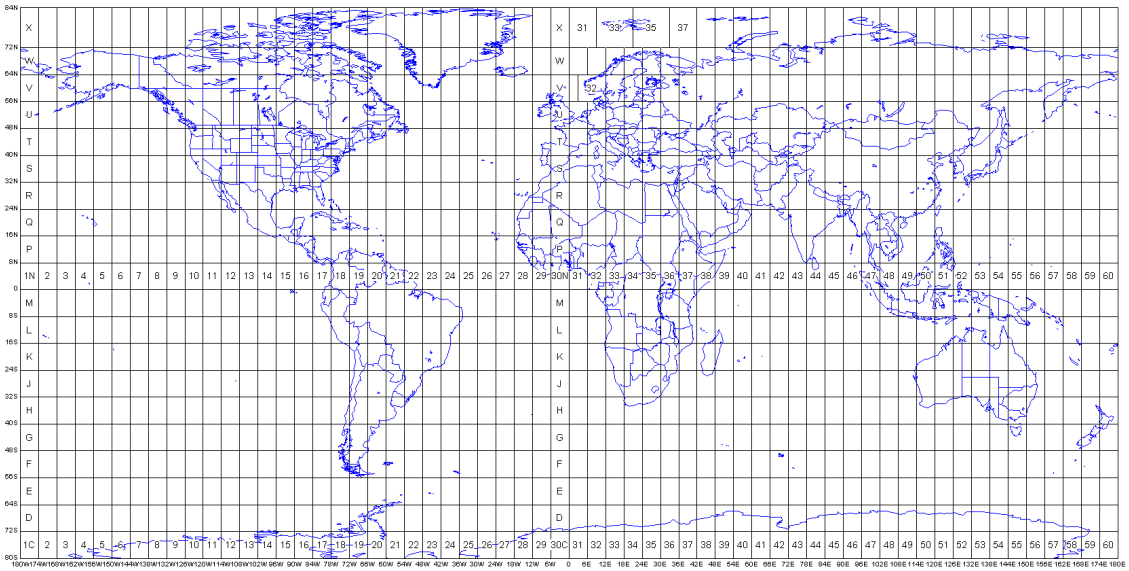


(CORREA, 2017)

[2] A origem está localizada no centro de massas da terra.

O UTM é um sistema de coordenadas que utiliza o plano cartesiano bidimensional para sua representação. Neste sistema de projeção de mapas, a Terra é divida em sessenta zonas sul e norte, cada uma com 6 graus de diferença.

Figura 4 – Zonas UTM



<https://www.dmap.co.uk/utmworld.htm>

No contexto deste projeto, que envolve o Sapiens Parque em Florianópolis, Santa Catarina, observamos que a região está localizada dentro da zona 22 sul UTM. Para facilitar a importação de coordenadas de pontos úteis e do resultado da simulação para o software Google Earth[3], optamos pelo uso do WGS84, amplamente utilizado globalmente, inclusive no Global Positioning System (GPS).

Na Figura 5 vemos a coordenada da torre utilizada no estudo definida nas propriedades do documento.

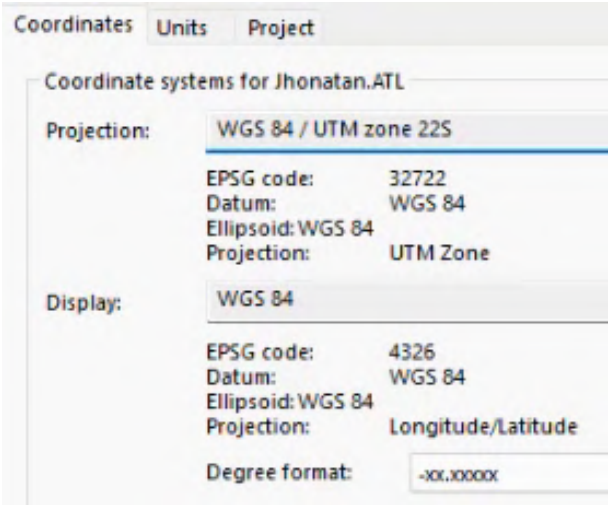
3.4 Base de dados

Para iniciar um projeto, é essencial contar com um arquivo de mapa contendo informações topográficas. É possível obter mapas mais simples, fornecendo apenas dados básicos, como a altura do relevo, ou optar por mapas mais complexos, que incluem informações detalhadas sobre solo, edifícios e vegetação. Essas informações são cruciais para a precisão no cálculo de indicativos relevantes ao projeto, ajustados de acordo com o modelo de propagação escolhido.

Neste projeto em específico, utilizou-se um mapa no formato *clutter*, referente a um arquivo que detém informações minuciosas sobre classes distintas, como superfície, água, vegetação e construções. A região selecionada para o desenvolvimento do projeto

[3] <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/>

Figura 5 – Projeção de mapa utilizada no projeto

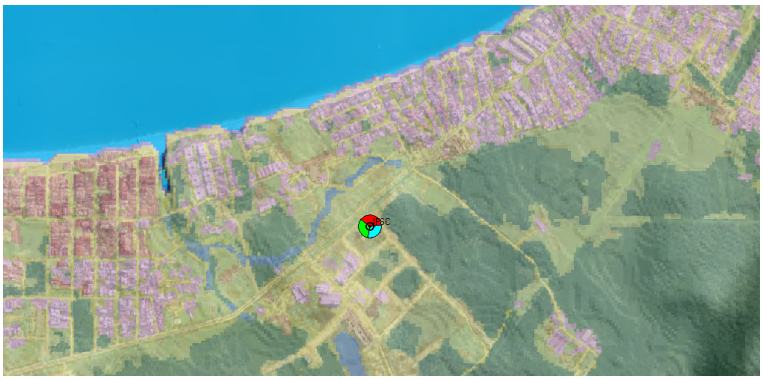


Fonte: Elaborada pelo autor.

compreende a parte norte da ilha de Florianópolis, abrangendo o Sapiens Parque. O mapa em questão foi gentilmente cedido pela BW Tech, que também disponibilizou o software necessário.

Ao carregar o mapa em formato *clutter* no Atoll, é possível notar na Figura 6 a riqueza de detalhes mencionada, onde temos cores indicando áreas de floresta ou urbana. Em lugares que temos uma cor verde escuro, temos uma região de floresta alta, temos nítido as áreas urbanas separadas pela cor indicando as ruas, edifícios baixos como casas até edifícios altos como prédios, evidenciando a complexidade das informações contempladas no processo.

Figura 6 – Mapa do projeto



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Posicionamento da torre

Temos uma torre, também denominada site, localizada nas coordenadas X: -48,44167 e Y: -27,42829, com capacidade de *backhaul* de 950 Mbps. Essas coordenadas

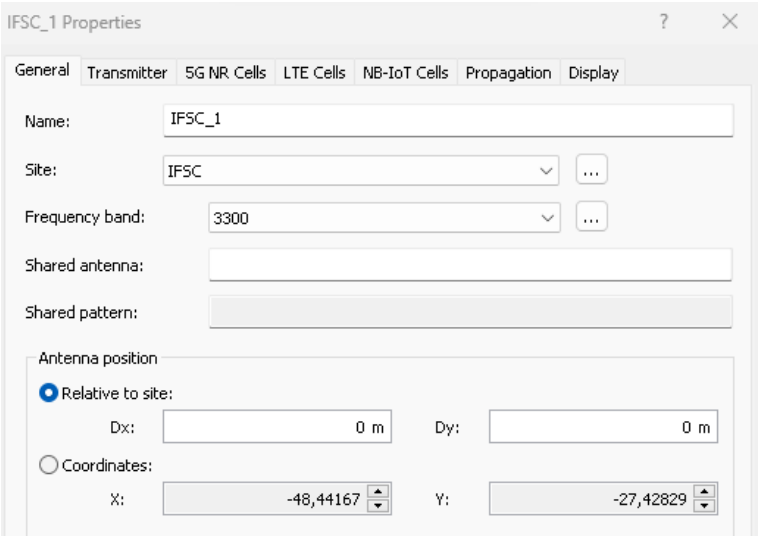
foram determinadas por meio de uma medição real, utilizando como referência uma torre já existente no local, onde estão instalados os rádios LTE das operadoras nacionais. Essa abordagem contribui para que o projeto se assemelhe mais a um cenário prático, evitando a necessidade de posicionar uma nova torre em um local novo. Além disso, possibilita a comparação entre os resultados obtidos na simulação com o 5G e as medições realizadas com a infraestrutura atual do 4G.

A seguir, apresentamos a Figura 7 que exibe a interface de *backhaul* do site, juntamente com a Figura 8 da interface inicial do transmissor do mesmo.

Figura 7 – Informações de backhaul do site

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Informações gerais do transmissor



Fonte: Elaborada pelo autor.

No software, ao posicionar um site, definimos a frequência como 3,3 GHz e a altura do transmissor em relação ao solo em 30 metros. O tipo de antena que utilizaremos neste projeto é um modelo padrão do software, compatível com a tecnologia *Beamforming*, composto por um total de 64 transmissores e 64 receptores, com uma abertura de 90º e ganho de 24 dBi para bandas baixa e média, conforme ilustrado na Figura 9.

A antena escolhida não possui um modelo específico no mercado, conforme indicado no próprio software. No entanto, é possível importar antenas reais, utilizando os resultados

de testes empíricos no formato Atoll. Dessa forma, obtemos o diagrama de radiação da antena.

Uma antena ideal, com ganho unitário, que irradia uniformemente em todas as direções - também conhecida como radiador isotrópico - geralmente é empregada como referência para os ganhos de antenas em sistemas sem fio. A Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) é definida pela fórmula apresentada na Equação 3.1. (RAPPAPORT, 2001)

$$EIRP = P_t - L_c + G_a \tag{3.1}$$

Onde:

- P_t - Potência de transmissão;
- L_c - Perda no cabo;
- G_a - Ganho da antena;

As antenas transmissoras com *beamforming* não necessitam de ligação de cabos com a gNB, pois estação rádio base e antena estão incorporadas no mesmo equipamento. Portanto não possuem perda de potência pelo cabo, aumentando a efetividade de transmissão do sinal.

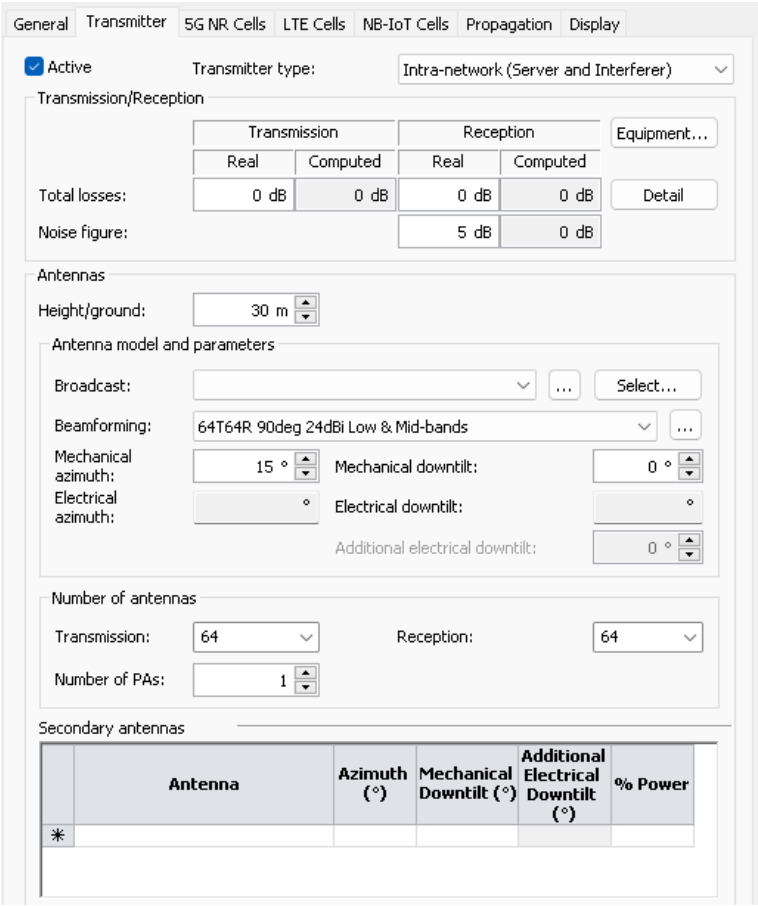
Ainda na interface das propriedades do site, temos alguns parâmetros da célula 5G como a largura de banda da portadora, que neste projeto foi utilizada uma largura de banda de 50 MHz por indicação da BW Tech. Demais informações de configuração da célula foram utilizados os valores padrão, como a potência de transmissão no máximo da célula com o valor de 50 dBm.

Por fim, estabelecemos o modelo de propagação padrão e a resolução do transmissor. A resolução deve ser equiparada à do mapa. Dado que utilizamos um mapa bastante detalhado, optamos por uma resolução de 10 metros. Isso garante uma simulação sem perda de informações, aproveitando ao máximo os detalhes do mapa.

3.6 Modelo de propagação

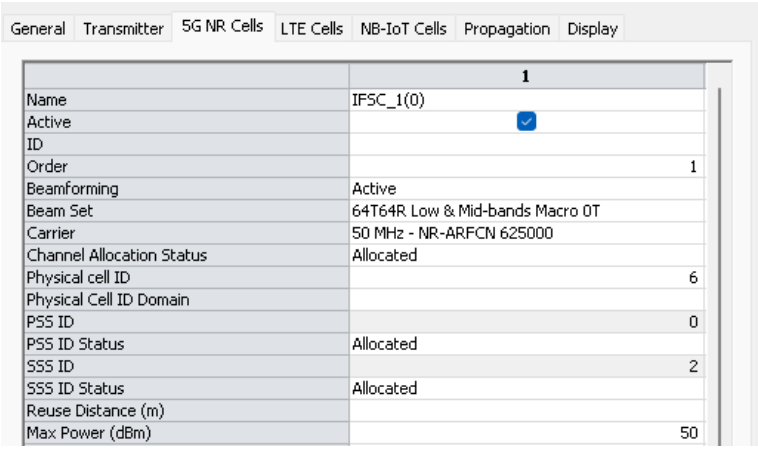
O modelo de propagação utilizado foi o modelo padrão disponibilizado do software com o nome de *Standard Propagation Model*, devido a limitações do software, por se tratar de uma licença de teste e também por recomendação dos especialistas da BW Tech. Segue a Figura 12 com os parâmetros utilizados neste modelo de propagação com a mesma resolução do mapa de 10 metros e com raio de cálculo de 8000 metros, ou seja, 8 quilômetros. Isso significa que mesmo que não seja delimitada uma área ou polígono

Figura 9 – Informações do transmissor



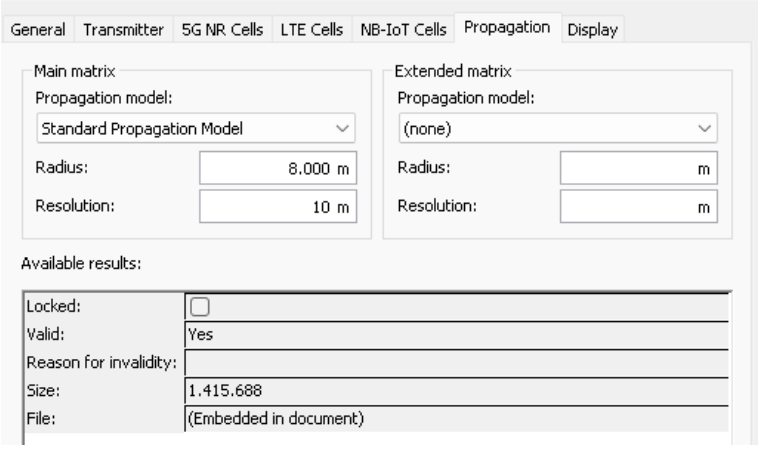
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Informações da célula 5G do transmissor



Fonte: Elaborada pelo autor.

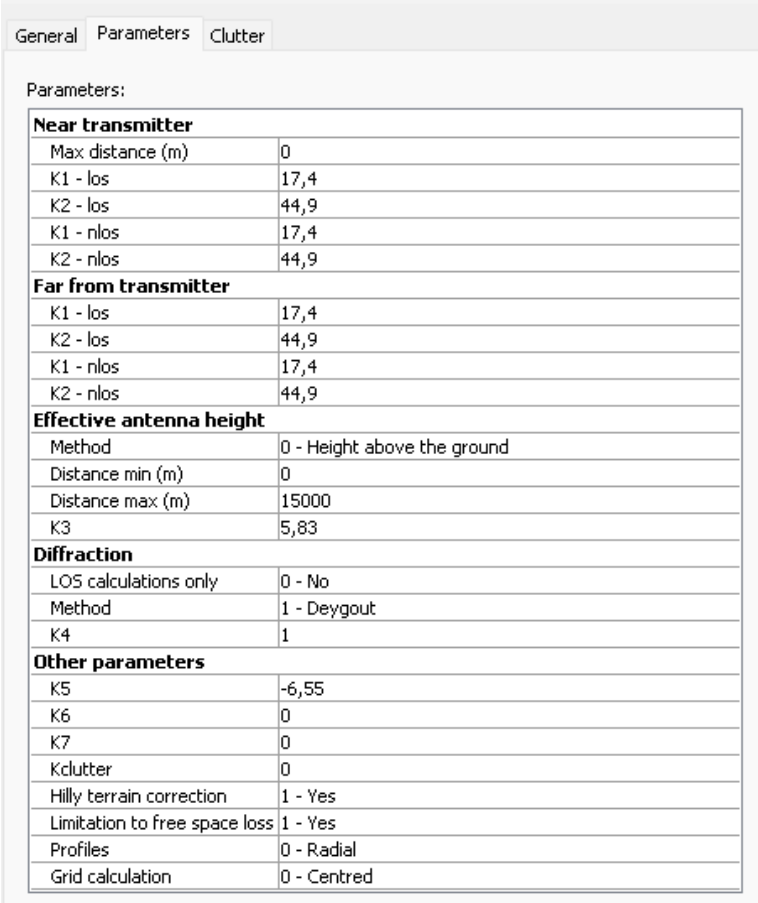
Figura 11 – Informações do modelo de propagação do transmissor



Fonte: Elaborada pelo autor.

para o cálculo da predição, será automaticamente delimitada ao raio de 8 quilômetros do transmissor como o centro.

Figura 12 – Informações do modelo de propagação do transmissor



Near transmitter	
Max distance (m)	0
K1 - los	17,4
K2 - los	44,9
K1 - nlos	17,4
K2 - nlos	44,9
Far from transmitter	
K1 - los	17,4
K2 - los	44,9
K1 - nlos	17,4
K2 - nlos	44,9
Effective antenna height	
Method	0 - Height above the ground
Distance min (m)	0
Distance max (m)	15000
K3	5,83
Diffraction	
LOS calculations only	0 - No
Method	1 - Deygout
K4	1
Other parameters	
K5	-6,55
K6	0
K7	0
Kclutter	0
Hilly terrain correction	1 - Yes
Limitation to free space loss	1 - Yes
Profiles	0 - Radial
Grid calculation	0 - Centred

Fonte: Elaborada pelo autor.

Este modelo de propagação é recomendado para o uso em uma distância de 1 quilômetro a 20 quilômetros, é compatível com arquivo de mapa do tipo *clutter* e

com as tecnologias *Global System for Mobile Communications* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), LTE, *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), *Wireless Fidelity* (WiFi) e 5G.

Este modelo de propagação é baseado nas fórmulas do modelo Hata e segue a Equação 3.6 abaixo.

$$P_R = P_{Tx} - (K_1 + K_2 * log(H_{Tx_{eff}}) + K_4 * DiffractionLoss + K_5 * log(d) * log(H_{Tx_{eff}}) + K_6 * H_{Rx_{eff}} + K_7 * log(H_{Rx_{eff}}) + K_{clutter} * f(clutter) + K_{hill,LOS}) \quad (3.2)$$

Essas constantes têm o seguinte significado:

- P_R - Potência recebida (dBm);
- P_{Tx} - Potência transmitida (dBm);
- K_1 - Deslocamento constante (dB);
- K_2 - Fator multiplicador para $log(d)$;
- d - Distância entre o receptor e o transmissor (m);
- K_3 - Fator multiplicador para $log(H_{Tx_{eff}})$;
- $H_{Tx_{eff}}$ - Altura efetiva da antena transmissora (m);
- K_4 - Fator multiplicador para o cálculo da difração. Precisa ser um número positivo;
- $DiffractionLoss$ - Perdas devido à difração sobre um caminho obstruído (dB);
- K_5 - Fator multiplicador para $log(H_{Tx_{eff}}) * log(d)$;
- K_6 - Fator multiplicador para $log(H_{Rx_{eff}})$;
- $H_{Rx_{eff}}$ - Altura da antena móvel (m);
- $K_{clutter}$ - Fator multiplicador para $f(clutter)$;
- $f(clutter)$ - Média de perdas ponderadas devido ao *clutter*;
- $K_{hill,LOSS}$ - Fator corretivo para regiões montanhosas (0 para NLos);

Tabela 3 – Possíveis valores para as constantes

Constante	**Mínimo**	**Típico**	**Máximo**
K1	Variável	Variável	Variável
K2	20	44,9	70
K3	-20	5,83	20
K4	0	0,5	0,8
K5	-10	-6,55	0
K6	-1	0	0
K7	-10	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 3 possui alguns valores possíveis das constantes usadas na fórmula do modelo de propagação padrão escolhido.

Segundo a própria documentação disponibilizada no software, é recomendado definir o valor da constante K6 para 0 e usar o K7 ao invés do K6. O valor de K6 é um coeficiente multiplicativo para um valor em dB, que significa que uma leve variação em K6 tem impacto considerável na perda de caminho.

K1 é uma constante que o valor depende da frequência utilizada. Segue a Tabela 4 com alguns valores possíveis para K1. Esses valores são fortemente influenciados pelo valores de perda pelo *clutter*.

Tabela 4 – Valores para K1 de acordo com a frequência

Frequência[Mhz]	**K1**
935	12,5
1805	22
1930	23
2110	23,8
1900	23
2300	24,7
2500	25,4
2700	26,1
3300	27,8
3500	28,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

A média das perdas devido ao clutter, ou seja $f(clutter)$, é definido na Equação 3.3.

$$f(clutter) = \sum_{.1}^{n} L_i \times w_i \tag{3.3}$$

Onde L é igual a perda devido ao *clutter*, w é igual ao peso, n é igual ao número de pontos considerados no perfil.

As perdas devido ao *clutter* são calculados pela distância máxima a partir do receptor, definido como distância máxima na tabela do clutter onde definimos as propriedades do modelo de propagação padrão. Ao ser definida a distância máxima com o valor 0, o software considera apenas a perda no pixel onde o receptor está localizado. Na tabela do

clutter está atribuído uma perda em dB para cada classe de clutter, como será visto a seguir e uma função que permite ponderar cada ponto do mapa.

É possível permitir que o próprio software calcule as perdas específicas para cada classe clutter usando uma função chamada de "Assistente de calibração automática". Na Tabela 5 é possível observar os valores comuns de perda em dB para cada classe clutter.

Tabela 5 – Perdas por classe clutter

Classe clutter	**Perdas [dB]**
Urbano denso	4 a 5
Floresta	2 a 3
Urbano	0
Suburbano	-5 a -3
Industrial	-5 a -3
Urbano e aberto	-6 a -4
Aberto	-12 a -10
Água	-14 a -12

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o modelo de propagação padrão do Atoll é baseado nas fórmulas do modelo de propagação de Hata, então os valores apresentados acima são válidos para um ambiente urbano. Estes valores são consistentes com um ambiente urbano porque são indicadas perdas de 0 dB para uma classe urbana do *clutter*, com valores positivos para classes mais densas e valores negativos para classes menos densas.

3.7 Simulação

Ao carregar as informações cruciais para o projeto, tais como o mapa, as torres, seus transmissores e o modelo de propagação selecionado, torna-se possível dar início ao processo de simulação. Nesta fase, será possível observar as diferenças nos mapas de calor relativos aos diferentes objetivos de previsão, tais como a taxa de transmissão de Downlink, Uplink, qualidade de sinal e identificação do melhor transmissor para um determinado ponto onde o User Equipment (UE) estará posicionado.

As simulações foram categorizadas com base em níveis de sinal, melhor servidor, capacidade e ordem de modulação. Os resultados obtidos foram alcançados utilizando a altura do dispositivo de recepção a 1,5 metros do solo, referente a altura aproximada de usuário com smartphone.

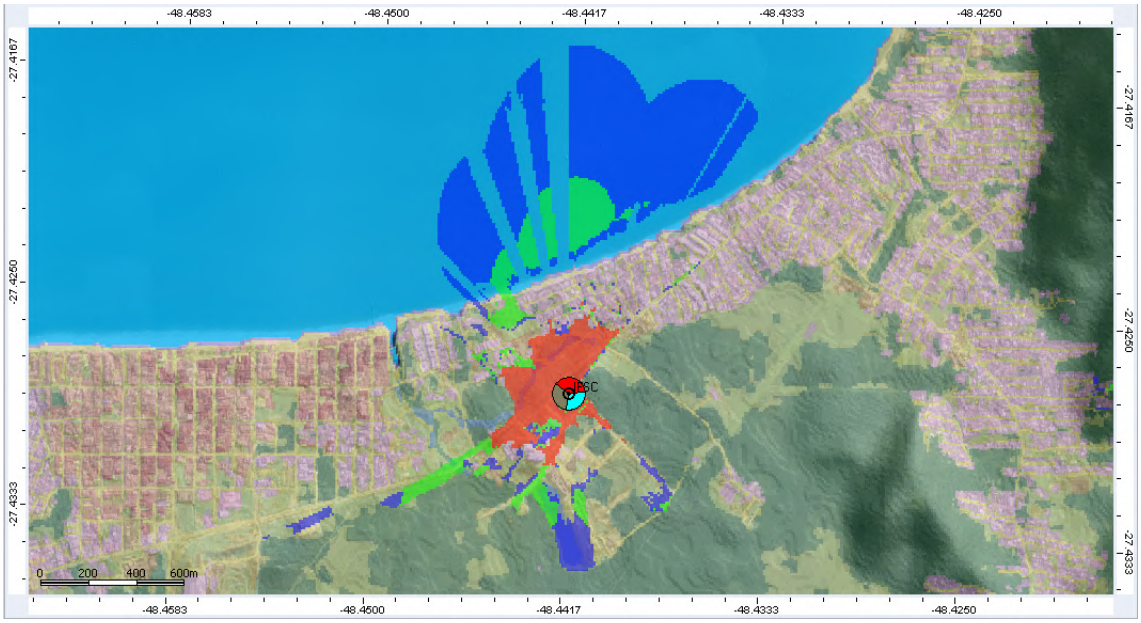
Os mapas de calor gerados pelas simulações podem ser exportados para visualização no Google Earth ao salvar uma predição em formato KMZ. Essa abordagem permite a análise do estudo utilizando imagens atualizadas de uma determinada área. Uma vez que o Atoll foi disponibilizado por um período de 15 dias, essa funcionalidade foi explorada. Consequentemente, todas as predições foram salvas em formato KMZ e analisadas por meio do Google Earth.

3.7.1 Nível de sinal

Como parte fundamental de um projeto de rádio frequência, devemos estar atentos na determinação dos níveis de sinal de recepção para os dispositivos que serão conectados em nosso ambiente de uso, buscando melhorar a qualidade de serviço com uma cobertura adequada. Para alcançar esse objetivo, realizamos o cálculo desses níveis de recepção em cada pixel do mapa, de acordo com a precisão estabelecida no início do projeto. Utilizamos uma resolução de 10 metros, indicando que nossa precisão se estende até 10 metros, o que significa que cada pixel empregado no cálculo da simulação representa uma distância de 10 metros.

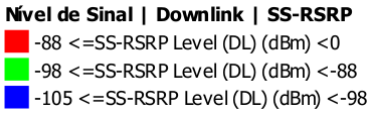
Nas figuras a seguir, é possível observar os resultados da simulação para os níveis de RSRP na região designada, cada uma acompanhada de sua respectiva legenda. A Figura 13 apresenta os níveis de sinal de recepção de Downlink, ou seja, a transmissão de informações da célula para o dispositivo móvel.

Figura 13 – Nível de sinal de downlink



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Legenda do nível de sinal de downlink

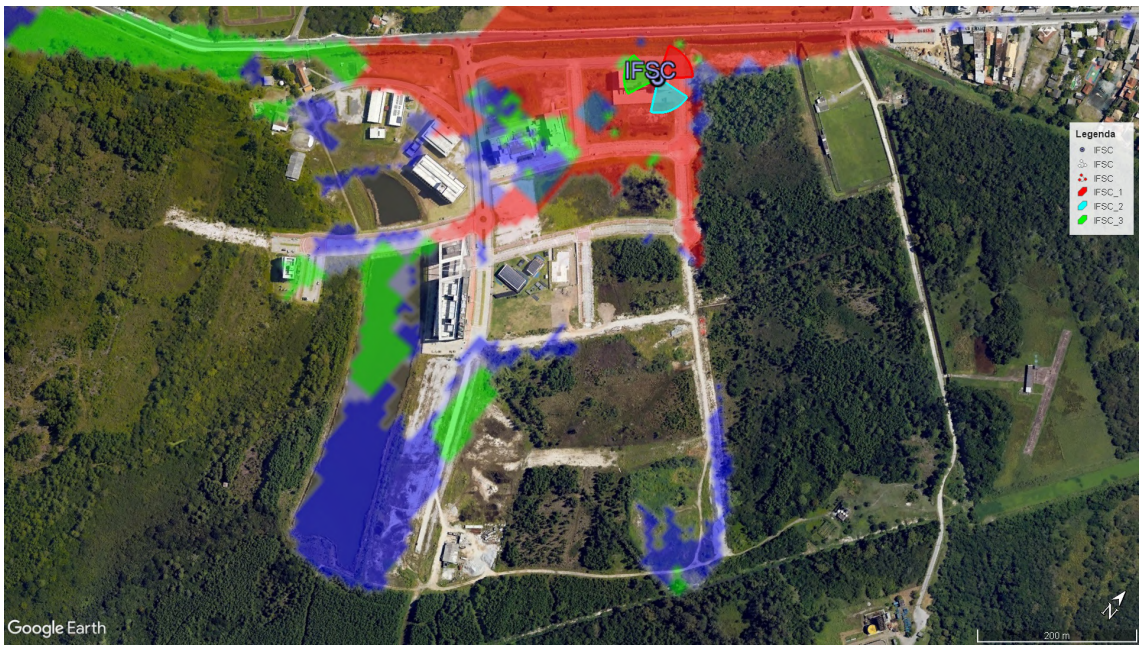


Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando a mesma legenda, podemos observar em maior escala no Google Earth na Figura 15 que a cobertura não alcançou toda a área esperada do Sapiens Parque. Porém, a área de maior trânsito de pessoas e maior concentração, está sim coberta com

um bom nível de sinal de recepção. Podemos observar que as construções, como os prédios presentes no local e também as regiões de árvores alteram a maneira da propagação. Essas informações condizem com o que é esperado, já que com obstruções no caminho de propagação em espaço livre, ocorrem as difrações ou reflexões da onda.

Figura 15 – Nível de sinal de downlink no Earth



Fonte: Elaborada pelo autor.

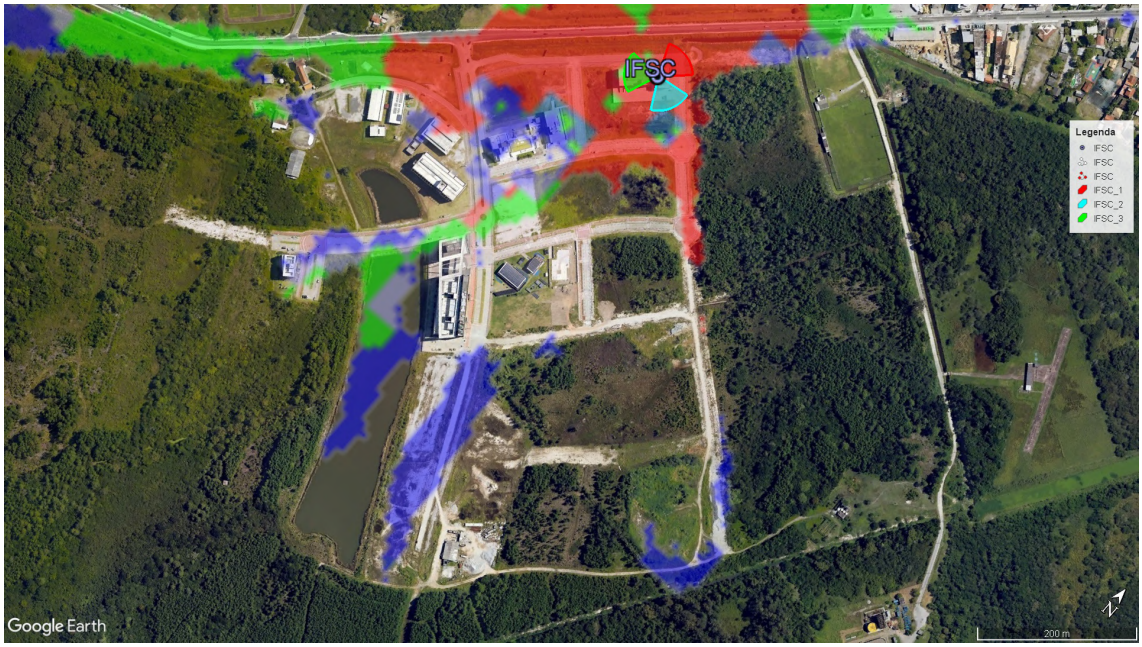
É possível notar que quanto mais próximo dos transmissores, melhor é o nível de sinal, ou seja, o nível de sinal é maior seguido a legenda disponibilizada. Essa predição foi realizada utilizando o modelo de propagação padrão, mas foi feito também apenas para a comparação, uma predição com o modelo Cost-Hata, visto no Capítulo 2. Segue a Figura 16 com o resultado da mesma predição com o modelo de propagação mencionado.

Como o modelo padrão foi o recomendado pela BW Tech por possuir maior compatibilidade com o mapa *clutter* e por melhor qualidade nos cálculos, é perceptível a diferença entre as predições com modelos de propagação diferentes e a cobertura mais afetada com o modelo Cost-Hata, que não é orientado a frequência de 3.5 GHz ou projetos 5G.

Na Figura 17 temos os níveis de sinal de recepção de Uplink, ou seja, troca de informações a partir do dispositivo móvel para a célula de transmissão.

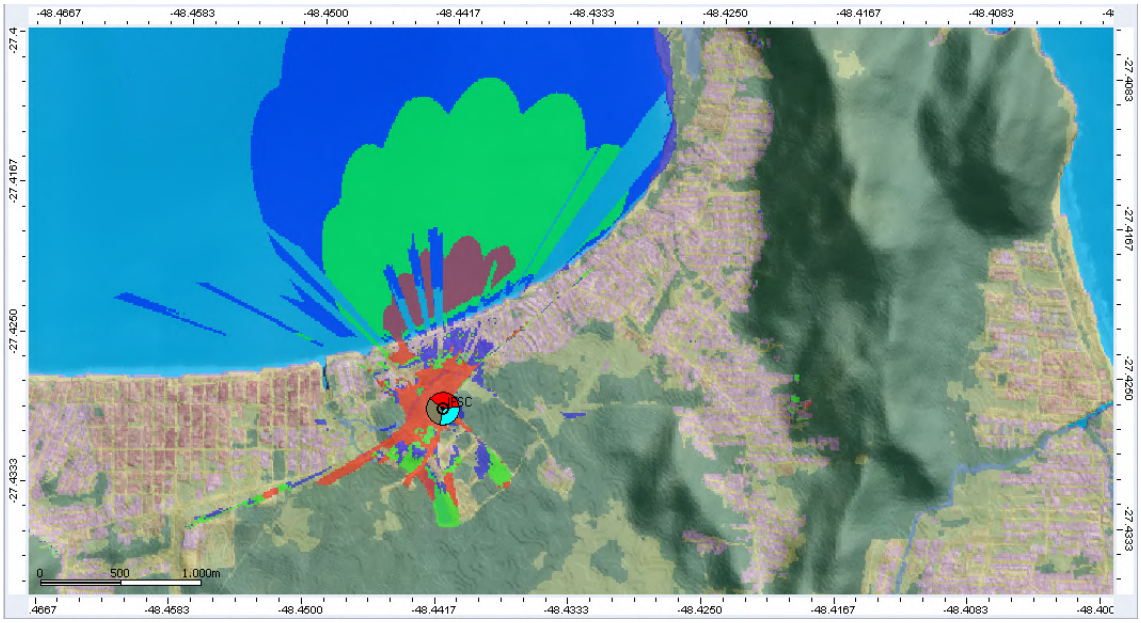
Ao analisarmos na Figura 19, no Google Earth, concluímos que temos uma boa parte da região coberta com um bom nível de sinal de uplink. Conforme a figura, temos valores de sinal de recepção maiores ou iguais a -88 dBm, que são considerados ótimos valores. Inclusive podemos considerar um nível de RSRP melhor do que encontramos na análise de downlink, desempenhando um papel essencial para determinação da velocidade

Figura 16 – Nível de sinal de downlink com modelo de propagação de Cost-Hata



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Nível de sinal RSRP de uplink



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Legenda do nível de sinal RSRP de uplink

Nível de Sinal | Uplink | SS-RSRP

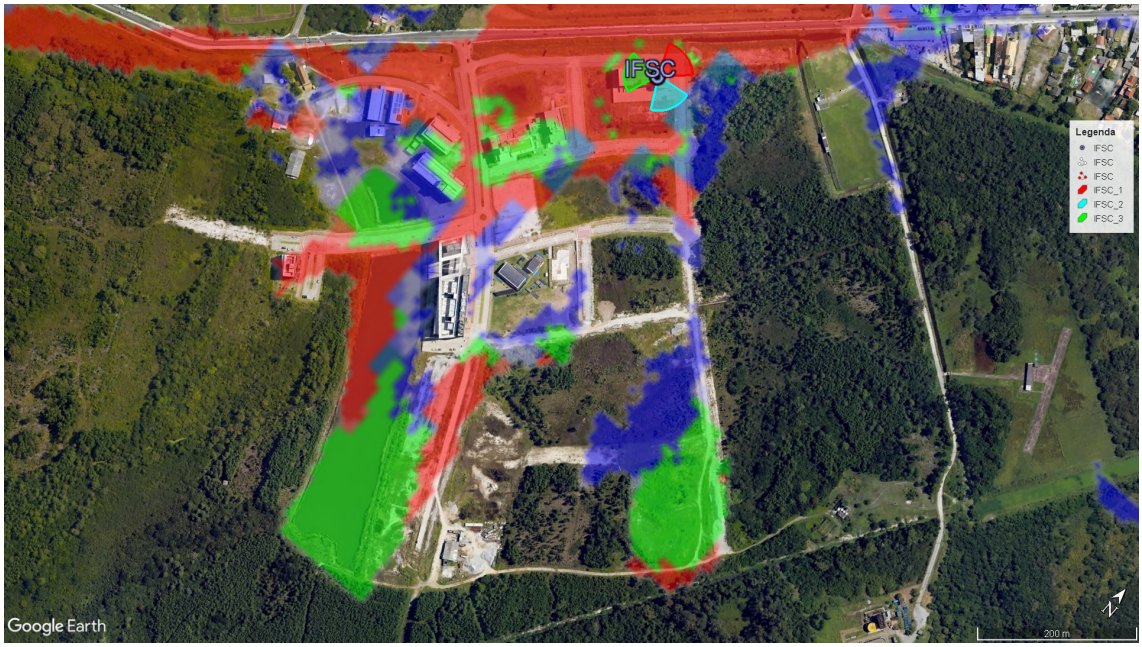
- -88 <=PUSCH & PUCCH Signal Level (UL) (dBm) <0
- -98 <=PUSCH & PUCCH Signal Level (UL) (dBm) <-88
- -105 <=PUSCH & PUCCH Signal Level (UL) (dBm) <-98

Fonte: Elaborada pelo autor.

de comunicação em uma rede.

Como o uplink refere-se à transmissão de dados do dispositivo do usuário para a estação base ou torre de celular. A qualidade e potência do sinal de uplink influenciam diretamente a capacidade do dispositivo de enviar informações de maneira eficiente. Quando o sinal de uplink é forte e estável, a transmissão de dados ocorre de maneira mais rápida e confiável. Esta é uma característica importante para atividades que envolvem o envio de dados, como upload de arquivos, envio de mensagens, transmissão ao vivo e interações em tempo real. Se o sinal de uplink for fraco, a velocidade de upload pode ser comprometida, resultando em transferências mais lentas de dados.

Figura 19 – Nível de sinal de uplink no Earth



Fonte: Elaborada pelo autor.

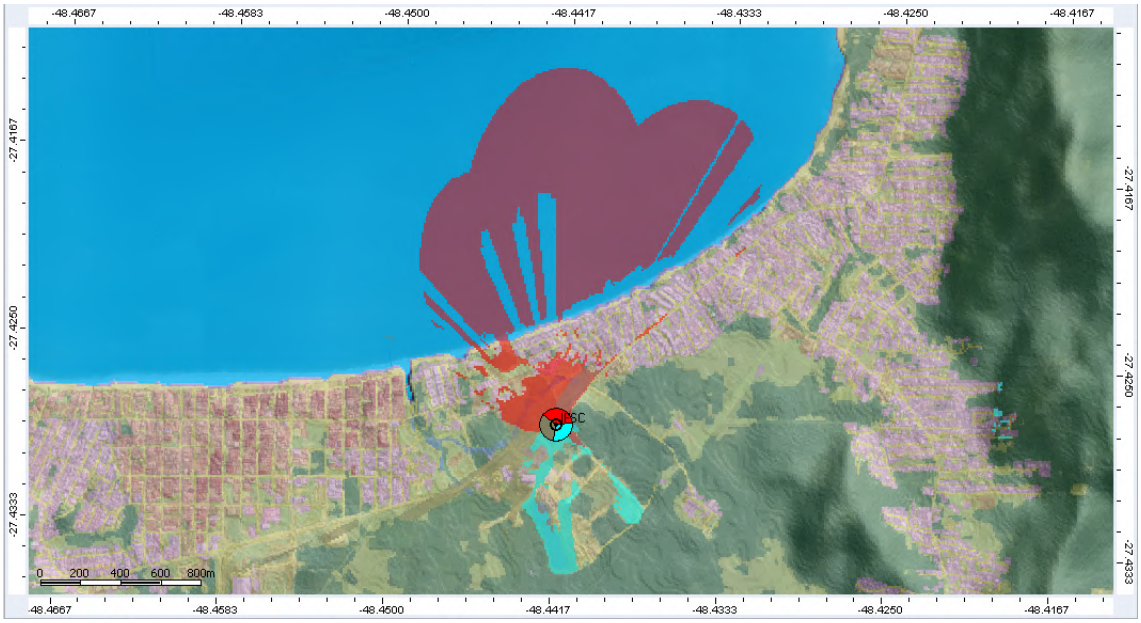
3.7.2 Melhor servidor

Durante a simulação obtemos dois tipos de valores em cada pixel, o melhor valor de recepção do sinal de cada servidor, ou seja, de cada transmissor ou o valor de recepção de sinal de todos os servidores. Ao utilizar a simulação para obter o valor de cada servidor, pode ser notado a sobreposição da cobertura de cada transmissor sobre o sinal propagado por outro transmissor que está na mesma torre.

Nas figuras a seguir podemos observar o resultado da simulação para os sinais de melhor servidor ou transmissor na região escolhida, todas acompanhadas de suas legendas. Na Figura 20 temos o sinal de cobertura do melhor servidor, porém podendo haver sobre posição do sinal de um transmissor sobre o outro por conta da distância entre eles. No software devido à maneira como foi definida a cor de representação dos transmissores, não

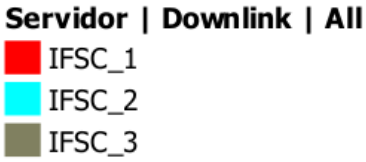
ficou intuitivamente visível a propagação do transmissor "IFSC_3", porém ao exportar esses dados para o Google Earth, é possível observar com cores mais vivas.

Figura 20 – Melhor servidor com sobreposição



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Legenda do melhor servidor com sobreposição



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 22 é possível observar a cobertura do melhor servidor ignorando a sobreposição existente, ou seja, se em um determinado pixel terreno recebe sinal de mais de um transmissor, irá nos mostrar no mapa de calor apenas o sinal do transmissor que tiver com o sinal mais forte.

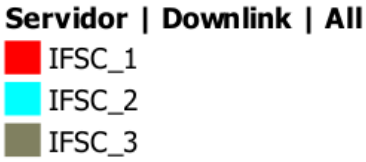
Analisando essa predição na Figura 24, notamos que grande parte da cobertura no Sapiens Parque é responsável por apenas dois transmissores, identificados como "IFSC_2"e "IFSC_3". O transmissor "IFSC_1", por conta do posicionamento na torre, em busca da cobertura padrão de 360º utilizada em projetos de RF, em conjunto com o próprio posicionamento da torre, acaba não favorecendo a cobertura da região.

Portanto, poderíamos ter uma cobertura mais satisfatória, caso o requisito fosse a maior cobertura possível do local, com a torre em um posicionamento mais estratégico em relação ao utilizado, buscando também a cobertura em áreas de sombra observadas no mapa de calor. Lembrando que a torre utilizada no projeto possui a localização de um site existente no local, para que pudéssemos ter um cenário mais próximo da realidade.

Figura 22 – Melhor servidor sem sobreposição

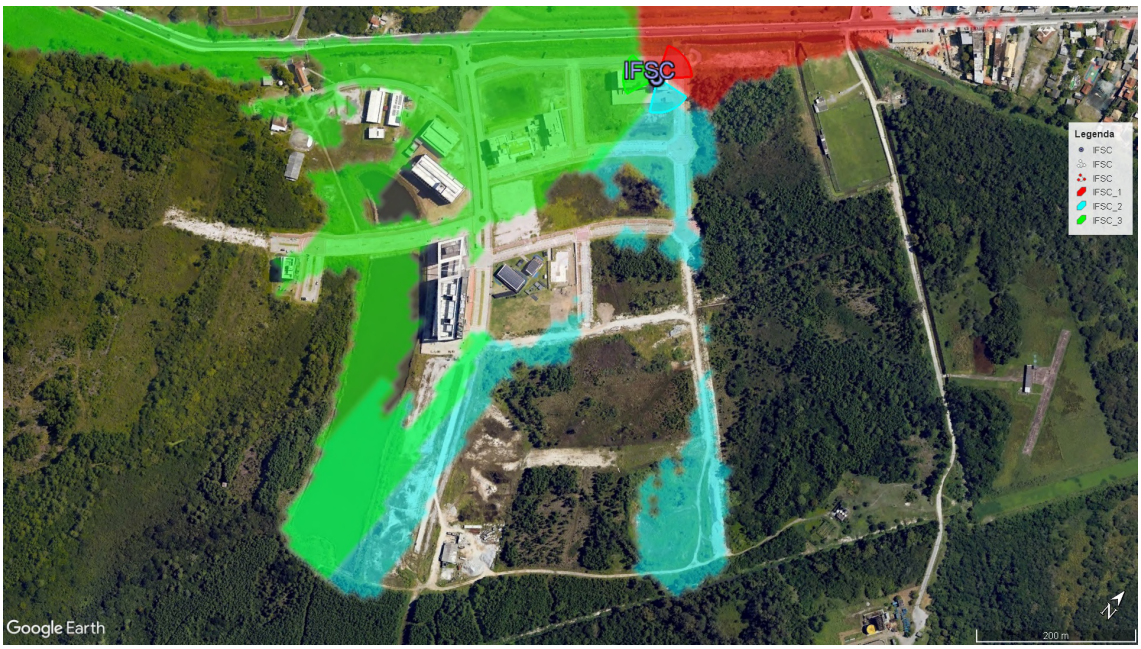
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Legenda do melhor servidor sem sobreposição



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Melhor servidor sem sobreposição no Earth



Fonte: Elaborada pelo autor.

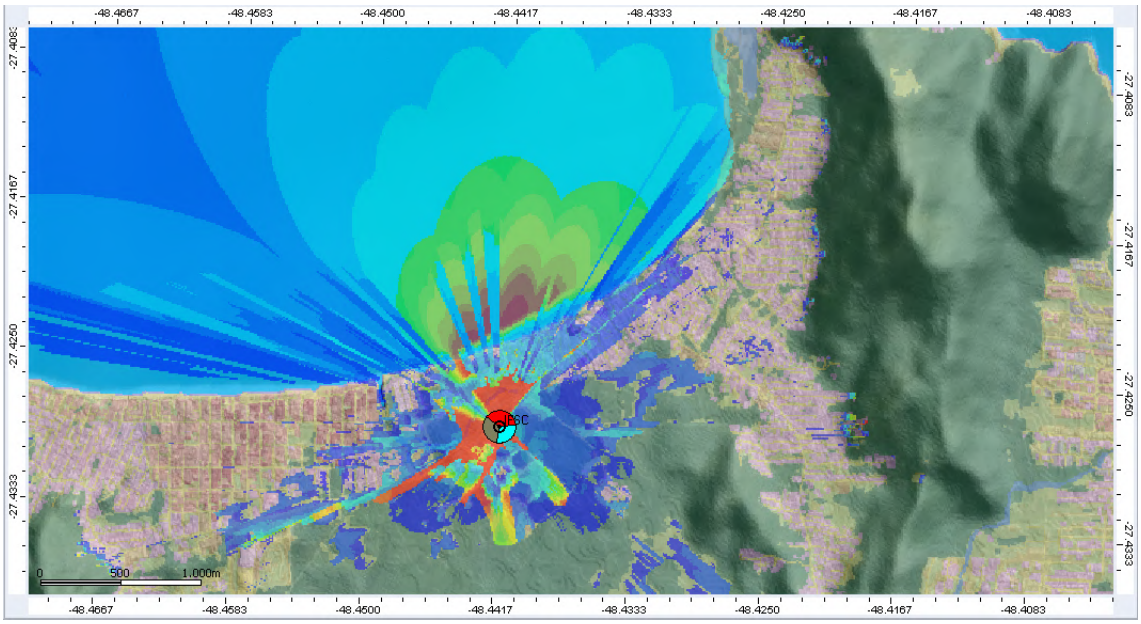
3.7.3 Capacidade

A simulação de capacidade nos informa a taxa de dados que o dispositivo conectado na célula poderá alcançar. Esta informação depende diretamente do link de backhaul. Como podemos observar nas Figura 25 e Figura 28, por definirmos o backhaul com uma taxa transmissão de dados de 950 Megabits por segundo, temos altos valores no dispositivo final, principalmente na região mais próxima do transmissor.

Esses valores além de dependerem do link de backhaul, também dependem da categoria do módulo 5G do dispositivo e do ganho de antena. Nesta simulação os dispositivos finais se referem a dispositivos móveis, como smartphones compatíveis com a tecnologia 5G que não possuem ganho de antena (ganho de antena = 0).

É possível aprimorar os valores obtidos de capacidade de transmissão de dados através de um recurso chamado de agregação de portadora, que não foi utilizado nessa simulação por não usarmos mais de um site. Porém o software nos traz essa possibilidade para enriquecer o estudo.

Figura 25 – Capacidade de downlink

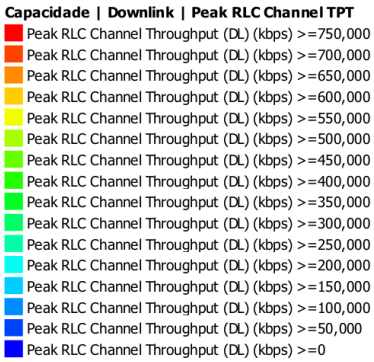


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 27 podemos observar, no Google Earth, as taxas de Downlink alcançadas dentro da área do Sapiens Parque delimitada pela linha em cor branca. Como a área é bem coberta, porém temos algumas regiões de sombra, notamos que são alcançadas velocidades acima de 100 Mbps em grande parte da cobertura, atendendo bem até em cenários que por exemplo, utilizem serviços de streaming de vídeo.

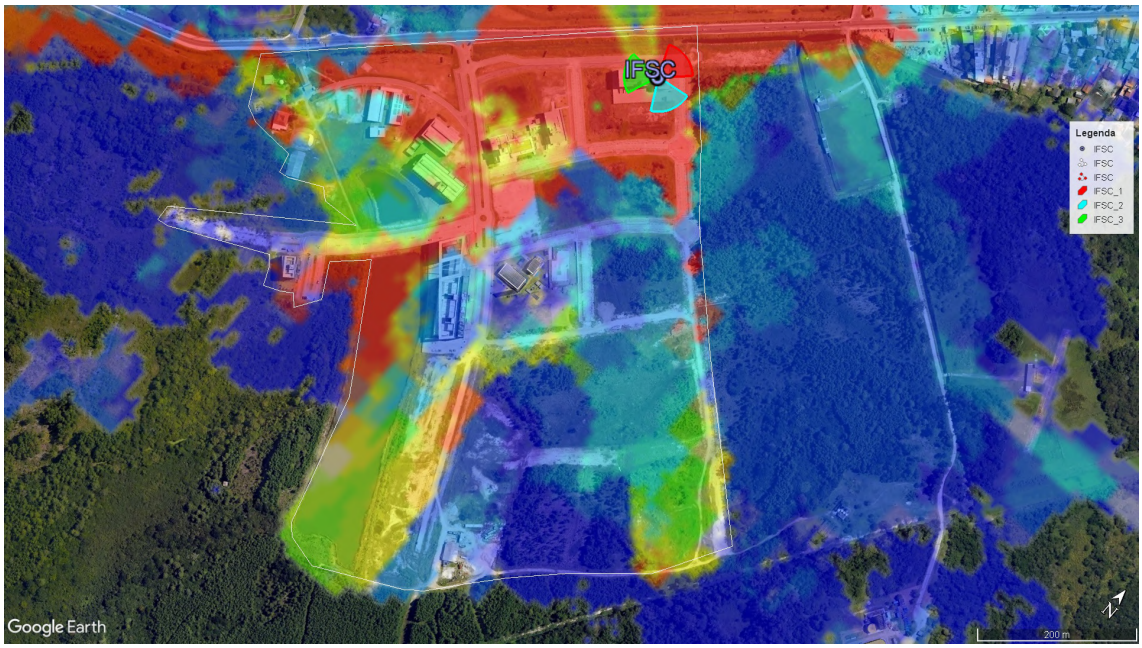
As taxas de uplink, geralmente são inferiores às taxas de downlink. Ainda assim conseguimos notar que são obtidos valores de pico acima de 25 Mbps em algumas partes

Figura 26 – Legenda da capacidade de downlink



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Capacidade de downlink no Google Earth



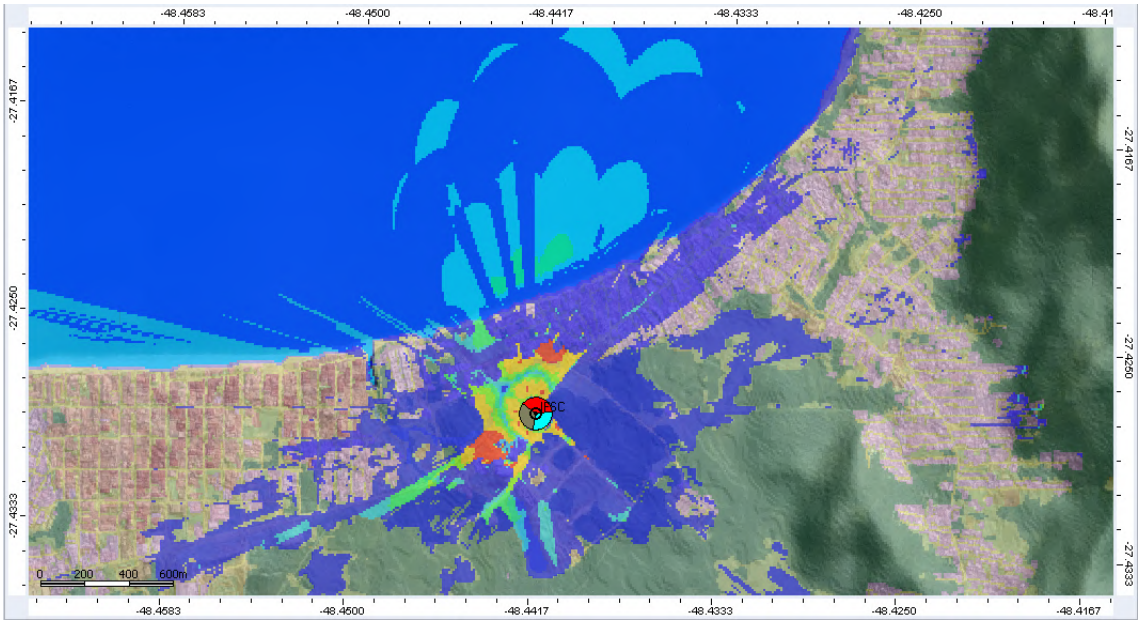
Fonte: Elaborada pelo autor.

da região delimitada, que permitem uma boa comunicação para envio de informações, como por exemplo para chamadas de vídeo. Por mais que são valores menores que as taxas de downlink, são considerados bons por não serem tão requisitados quanto para realização de uma requisição de informação da internet, onde a troca ocorre com mais frequência em cenários de consumo de usuários finais.

Segue na Figura 28 os valores de pico alcançados para a transmissão de Uplink, que são os valores de taxa de transmissão de informação do dispositivo móvel para a célula gNB.

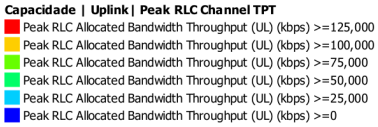
Segue a Figura 30 onde vemos a simulação no Google Earth com mais detalhes conforme mencionados, conseguimos notar com uma escala adequada as cores do mapa de calor e como está a cobertura na região delimitada.

Figura 28 – Capacidade de uplink



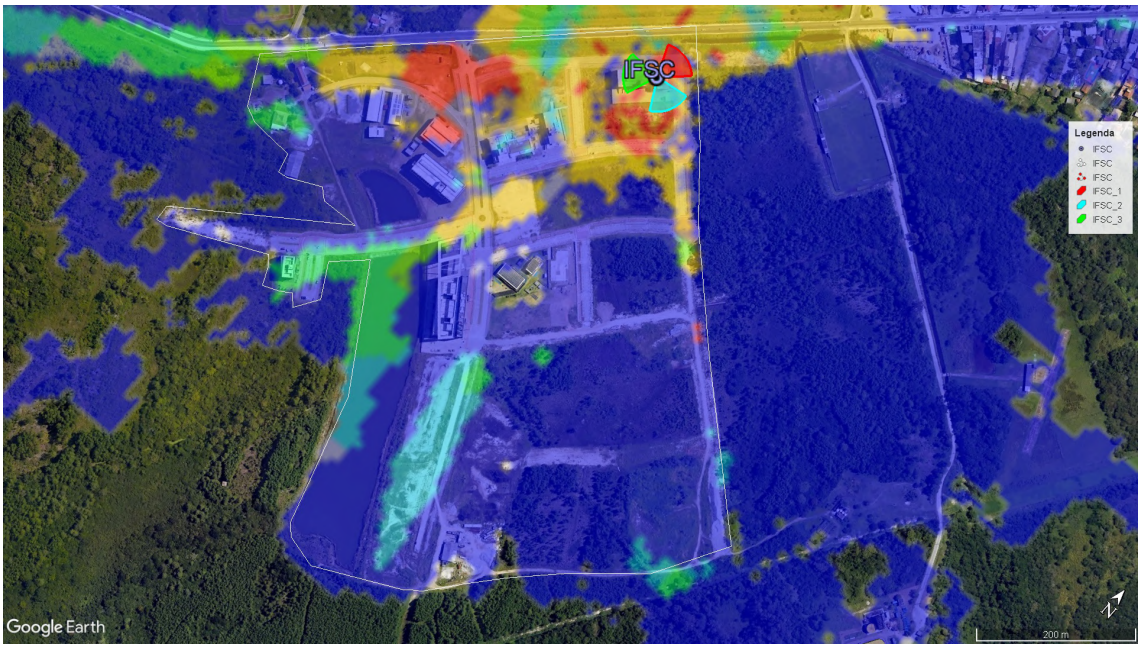
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Legenda da capacidade de uplink



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Capacidade de uplink no Google Earth



Fonte: Elaborada pelo autor.

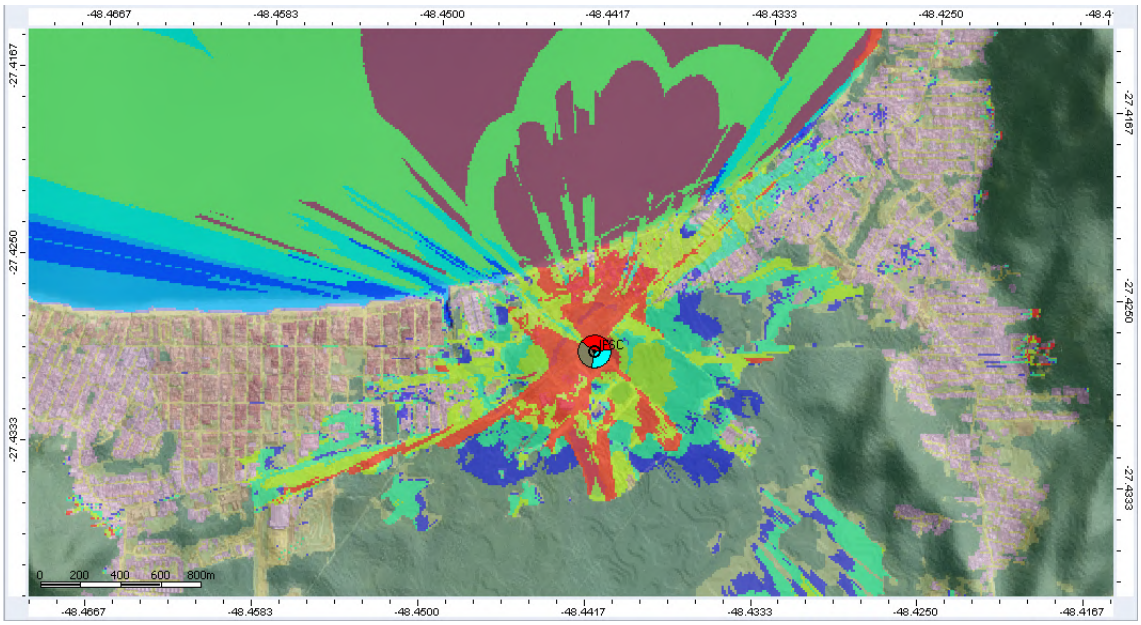
3.7.4 Qualidade

Na predição foi utilizado apenas um site com três transmissores, isso significa que na simulação há um mínimo fator de interferência entre os transmissores da mesma torre, mas não há interferência com outros sites como em um cenário real. Se houvesse mais de um site próximo, os cálculos seriam afetados e a qualidade de ambos os sites diminuiria.

Para diminuir os impactos da interferência entre os sites, é possível utilizar algumas manobras como por exemplo, a diminuição da potência dos transmissores ou incrementar alguns graus no tilt mecânico, fazendo com que a antena fique com um direcionamento maior para o solo. É possível analisar as simulações fazendo modificações nestes parâmetros através do software para chegar a um objetivo, porém como no estudo de cobertura não foi necessário o uso de mais de uma torre, não teve modificação.

Nas figuras a seguir podemos observar o resultado da simulação para as ordens de modulação que o dispositivo móvel pode alcançar na região escolhida, todas acompanhadas de suas legendas. Na Figura 31 temos os valores para modulação de Downlink, com 256 QAM como o melhor valor de ordem de modulação alcançado, que indica como as informações estão sendo transmitidas no canal determinado.

Figura 31 – Ordem de modulação de downlink



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 33 é observado que conseguimos atingir a máxima ordem de modulação de Downlink, de 256 QAM em boa parte do perímetro delimitado em cor branca, referente à área do Sapiens Parque. Significa então que temos mais bits sendo transmitidos ao mesmo tempo, permitindo as altas taxas de transmissão observadas anteriormente.

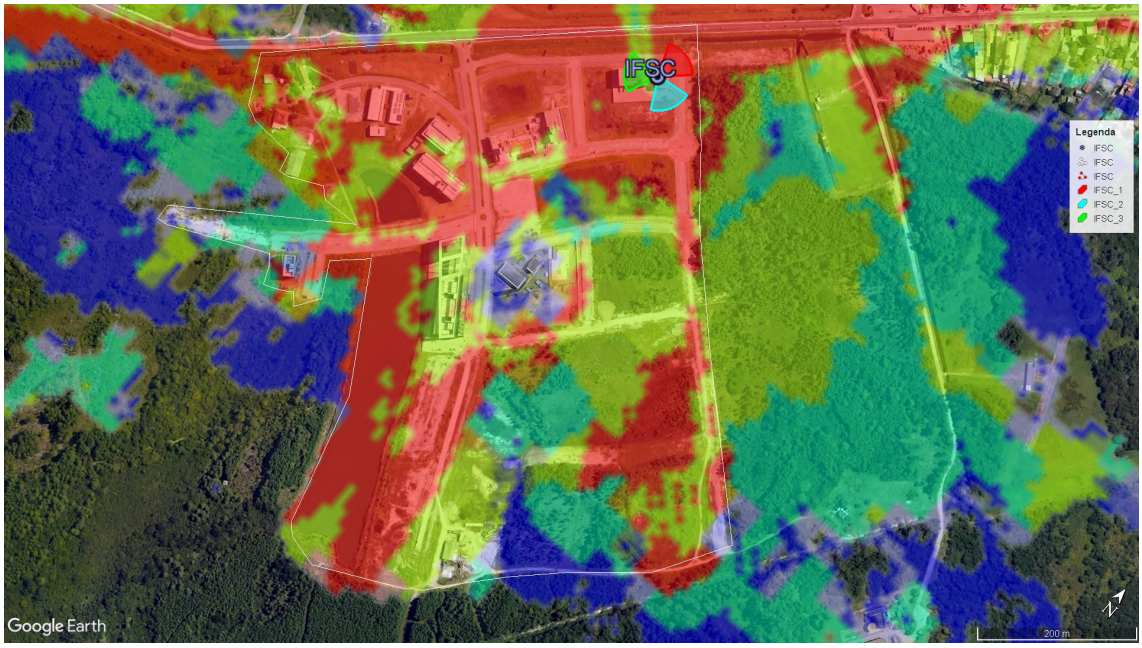
Observamos também que em poucas regiões da área delimitada temos a modulação

Figura 32 – Legenda da ordem de modulação de downlink

Fonte: Elaborada pelo autor.

QPSK que representa 2 bits, ou seja, podem ser transmitidos pequenos blocos de informação `00`, `01`, `10` e `11`. Enquanto isso, a modulação 256 QAM representa 8 bits, oferecendo maior capacidade de informações.

Figura 33 – Ordem de modulação de downlink no Google Earth



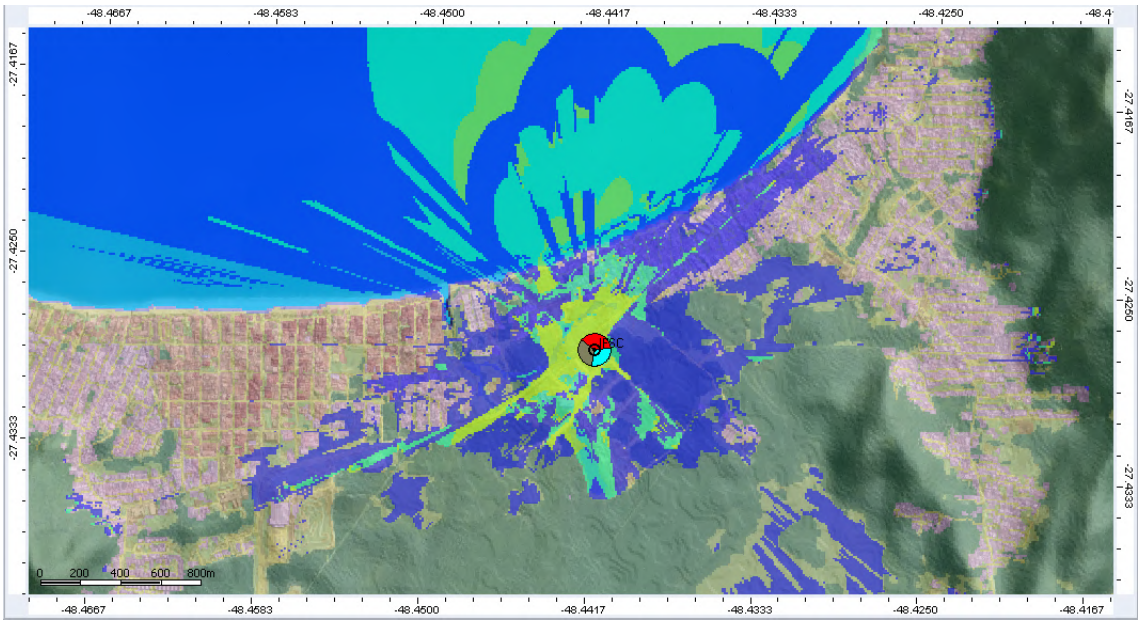
Fonte: Elaborada pelo autor.

Podemos observar na Figura 34 os valores de modulação alcançados no cenário para o Uplink. É comum que resultem em valores menores do que de Downlink por dependerem não apenas da antena transmissora do site, que também desempenha uma antena receptora, mas também da antena transmissora do dispositivo móvel, que não possui ganho.

Como mencionado a respeito da diferença entre o downlink e o uplink, podemos notar na Figura 36 que de fato a capacidade de informação a ser transmitida é menor. Enquanto a modulação alcançada no downlink foi 256 QAM, o máximo alcançado para o uplink, que podemos observar, foi a modulação 64 QAM que representa 6 bits.

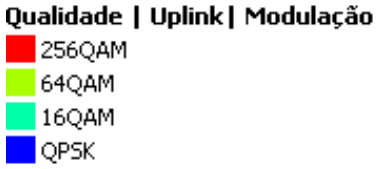
Esta diferença na modulação resulta na diferença de taxas de transmissão entre downlink e uplink que analisamos anteriormente. Outro ponto importante é a predomi-

Figura 34 – Ordem de modulação de uplink



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 – Legenda da ordem de modulação de uplink



Fonte: Elaborada pelo autor.

nância da modulação QPSK observada na predição, ou seja, é possível atingir os máximos valores de transmissão de uplink, mas não por grande parte a região coberta.

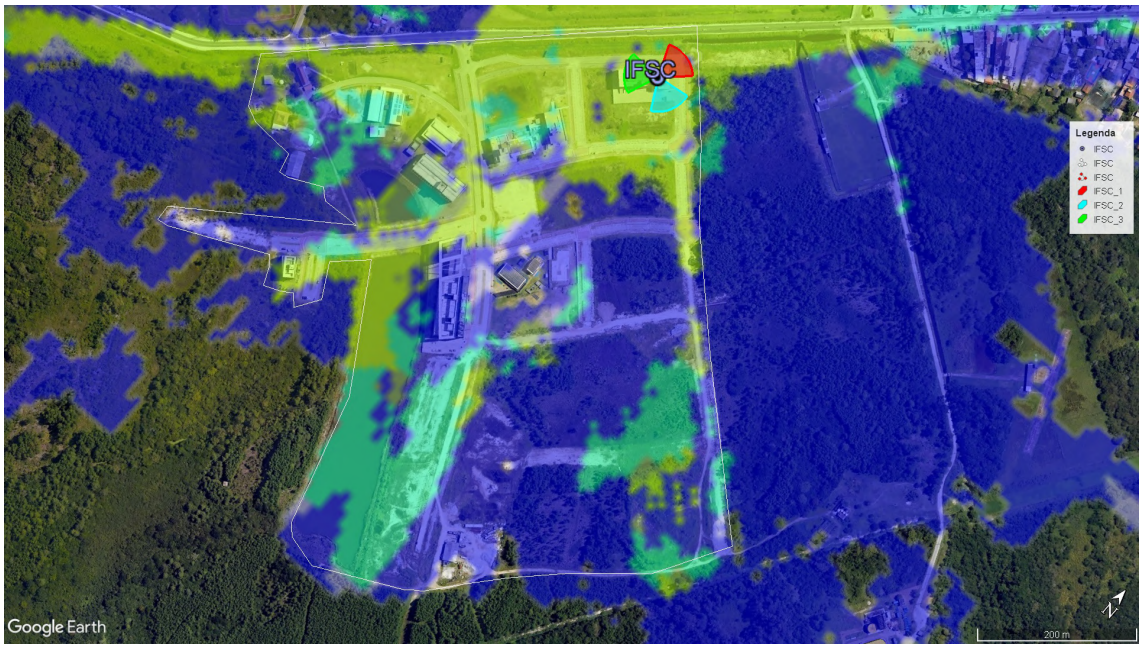
3.8 Otimização

É possível aprimorar a precisão da simulação ao compará-la com o cenário real após a instalação física do projeto. Ao conduzir medições na região simulada, utilizamos dados previamente observados, como modulação alcançada, nível de sinal de recepção, relação sinal-ruído, entre outras métricas de qualidade, para avaliar e confrontar os resultados obtidos na simulação.

A simulação proporcionou uma previsão da cobertura com base nos dados de entrada fornecidos. Após a implementação no local estratégico, torna-se possível identificar áreas de aprimoramento ou de menor qualidade em relação ao simulado, sendo essa variação influenciada pelo modelo de propagação escolhido no software.

A criação ou otimização do modelo de propagação pode ocorrer após sua utilização

Figura 36 – Ordem de modulação de uplink no Google Earth



Fonte: Elaborada pelo autor.

no software, mediante a realização de medidas com um dispositivo móvel, como um celular ou um equipamento específico para essa finalidade, pós-implantação. Cada ponto de localização é submetido à medição, obtendo-se o nível de sinal ou outras informações de qualidade desejadas, permitindo o desenvolvimento de uma fórmula aplicável ao cenário escolhido com a tecnologia sem fio específica.

Uma sugestão para futuras pesquisas seria realizar medições com um site 5G instalado na mesma localização do site 4G usado como referência, comparando os resultados obtidos na simulação com as medições efetuadas. Além disso, seria interessante comparar os resultados simulados no 5G com as medições no site 4G, possibilitando uma análise comparativa entre as duas gerações da tecnologia de rede móvel.

A otimização da predição pode ser aprimorada por meio da incorporação de medições detalhadas durante a fase pós-instalação do projeto. Essas medições adicionais, realizadas em diferentes pontos da área coberta, contribuem para a criação de um banco de dados mais robusto, permitindo uma calibração mais precisa do modelo de propagação utilizado na simulação. Ao comparar os resultados simulados com as medições reais, é possível identificar discrepâncias e ajustar parâmetros, refinando assim o modelo para refletir com maior precisão as condições específicas do ambiente.

Além disso, a coleta contínua de dados provenientes de dispositivos móveis após a implantação permite a adaptação dinâmica do modelo de predição. Essa abordagem em tempo real proporciona uma compreensão mais atualizada das condições de propagação, levando em consideração possíveis mudanças no ambiente. A implementação de algoritmos

de aprendizado de máquina pode ser explorada para analisar esses dados contínuos e ajustar automaticamente o modelo, garantindo uma otimização contínua e aprimorando a capacidade do sistema de se adaptar a variações nas condições do mundo real. Essa abordagem dinâmica não apenas melhora a precisão das predições, mas também assegura a eficiência a longo prazo da infraestrutura de comunicação sem fio.

4 CONCLUSÃO

O planejamento celular através do software permitiu a visualização de um mapa de cobertura, com identificação através de mapas de calor que indicaram os níveis de recepção de sinal, nível de qualidade, ordem de modulação e melhor servidor. Desta forma será possível saber onde os dispositivos receptores terão melhor qualidade de sinal, caso seja realizado a implantação de um site outdoor 5G na região escolhida no desenvolvimento deste projeto.

O software nos permitiu ter uma boa percepção de como a quinta geração de redes móveis na frequência de 3.5 GHz atua em um cenário próximo do IFSC Campus São José, o Parque Sapiens em Cachoeira do Bom Jesus, Florianópolis. Foi possível observar os tipos de modelos de propagação existentes para o 5G no software Atoll, uma importante e poderosa ferramenta que proporcionou o desenvolvimento desse projeto.

Além dos modelos de propagação compatíveis com o 5G, foi possível observar como antenas *beamforming* 64x64 trabalham na frequência de 3.5 GHz, entre outras novidades existentes no 5G em comparação às características existente no LTE. É notado um grande salto entre uma geração e outra, principalmente em questão de elaboração de novas técnicas para melhorar a qualidade de serviço em demanda ao aumento populacional, com pequena área de espaço físico, ou seja, a densidade demográfica. Essa é uma importante característica que deve ser levada em consideração na elaboração de projetos em locais de eventos ou grande trânsito de pessoas.

Uma das dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento do projeto foi o aprendizado do software em um curto período de tempo de 15 dias. Como o software possui uma vasta quantidade de funcionalidades ligadas à tecnologia 5G e às próprias disponibilidades do Atoll, não foi possível explorá-lo a fundo. Porém, foi uma experiência muito interessante ao ver tantas possibilidades com uma ferramenta tão sofisticada.

Conforme mencionado anteriormente no Capítulo 3, é sugerido como trabalho futuro, a coleta de medições de níveis de sinal e qualidade no local, caso seja implantado um site 5G utilizando as mesmas coordenadas da predição desenvolvida. Como no local já se tem um site 4G, é possível realizar as medições nos mesmos locais definindo a tecnologia que deseja medir. Ao final, pode ser realizada a comparação dos níveis de sinal obtidos com 4G e com o 5G para tentar buscar as principais diferenças entre as gerações.

Entre as sugestões de trabalho futuro, também é possível realizar a otimização dos modelos de propagação utilizados no 5G, caso seja implantado um site 5G no local. Com a otimização do modelo de propagação, podemos aprimorar o software e obtermos previsões ainda mais condizentes com a realidade, já que esse é um trabalho contínuo em busca da

maior precisão das simulações para o desenvolvimento de projetos de RF. A otimização pode ser realizada através de aprendizagem de máquina para obter a melhor eficiência do modelo de propagação proposto e garantir a qualidade da predição a longo prazo.

REFERÊNCIAS

3GPP. *NR; Base Station (BS) radio transmission and reception*. 2023. TS 38.104 Version 17.9.0. 18

AHMADI, S. *5g Nr: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*. [S.l.]: Elsevier Science and Technology, 2019. ISBN 9780081022672. 16

ALBERTI, A. M. et al. *OpenRAN: A conexão do futuro*. [S.l.]: Instituto Nacional de Telecomunicações, 2021. 14, 16, 17

ANATEL. *Leilão de espectro 5G*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/leilao-de-espectro-5g>. 18

CORREA, P. M. *Topografia e geoprocessamento*. [S.l.]: Sagah, 2017. 25

FORSK. *5G Network Planning*. 2023. Disponível em: <https://www.forsk.com/5g-network-planning>. 6, 7

OSSEIRAN, A. 5g wireless access: an overview. *Ericsson White Paper*, 4 2020. 14

RAPPAPORT, T. S. *Wireless communications*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2001. 18, 20, 21, 29

ROCHOL, J. *Sistemas de Comunicação sem Fio: Conceitos e Aplicações*. [S.l.]: Bookman Editora, 2018. 20