



Dissertação

Estudo da Perda de Percurso e do Perfil de Atraso de Potências na Frequência de 3500 MHz em Regiões Urbanas Densamente Vegetadas

Mestranda: Rávilla Raianni S. Leite

Orientador: Joabson N. de Carvalho, Dr.

**João Pessoa – PB
Dezembro de 2021**



Rávilla Raianni S. Leite

**Estudo da Perda de Percurso e do Perfil de Atraso de Potências na
Frequências de 3500 MHz em Regiões Urbanas Densamente
Vegetadas**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Telecomunicações

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.
Orientador

João Pessoa – PB, dezembro de 2021
©Rávilla Raianni Silva Leite – ravillasilva94@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa.

L533e Leite, Rávilla Raianni Silva.

Estudo da Perda de Percurso e do Perfil de Atraso de Potências na Frequências de 3500 MHz em Regiões Urbanas Densamente Vegetadas/ Rávilla Raianni Silva Leite. – 2021.

66 f. : il

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2021.

Orientação : Prof^o D.r Joabson Nogueira de Carvalho.

1. Canal de rádio móvel. 2. Redes móveis 5G. 3. Perda de percurso. 4. Resposta ao impulso de canal. 5. Linha de visada.
I. Título.

CDU 621.396(043)

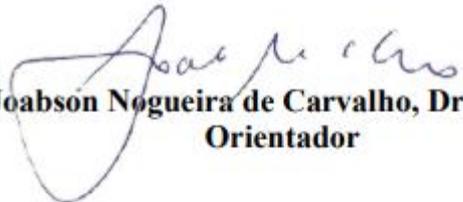
Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária – CRB 15/132

Estudo da Perda de Caminho e do Perfil de Atraso de Potências na Frequência de 3500 MHz em Regiões Urbanas Densamente Vegetadas

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário para prosseguimento da pesquisa para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA


Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB
Orientador


Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
Examinador Interno


Luiz Guedes Caldeira, Dr.
Examinador Externo

João Pessoa – PB
Dezembro de 2021

RESUMO

O crescente número de dispositivos conectados à internet, aliado à necessidade de uma rede mais segura, rápida e com capacidade para bilhões de dispositivos conectados, serviram de base para o desenvolvimento do 5G. Um dos fatores que determina o bom desempenho de uma rede de telefonia móvel é o conhecimento do canal de rádio móvel em que se deseja transmitir. Para isso, nesse trabalho, foram realizadas simulações na frequência 3500 MHz, uma das faixas destinadas para operação o serviço 5G/LTE, na cidade de João Pessoa, Brasil, visando a obtenção de alguns dos principais parâmetros de caracterização do canal: a perda de percurso, situação de visada (LOS e NLOS), a distribuição de potência na região e o perfil de atraso de potências. A região de estudo é caracterizada por possuir densas e extensas áreas de vegetação e construções bastante heterogêneas. Foi utilizado nas simulações o Modelo de Traçado de Raios Inteligente (IRT) e os resultados obtidos mostram a forte influência da vegetação e da obstrução no sinal transmitido, apresentando maiores espalhamentos de retardo nas componentes recebidas, atenuações e forte redução na banda de coerência nos pontos mais afetados pela vegetação.

Palavras-Chave: Canal de Rádio Móvel, 5G, Perda de Percurso, Resposta ao Impulso do Canal, Linha de Visada, Perfil de Atraso de Potências.

ABSTRACT

The growing number of devices connected to the internet, combined with the need for a more secure, fast and capable network for billions of connected devices, served as the basis for the development of 5G. One of the factors that determines the good performance of a mobile phone network is the study of the mobile radio channel on which it is desired to transmit. In this work, simulations were carried out on the frequency of 3500 MHz, intended for operation of the 5G / LTE, service in the city of João Pessoa, Brazil, in order to obtain some parameters of channel characterization: path loss, situation of sight (LOS and NLOS), the power distribution on the region and the power delay profile. The study region is characterized by dense and extensive areas of vegetation. The Intelligent Ray Tracing Model (IRT) was used in the simulations and the results obtained show the strong influence of vegetation and obstruction in the transmitted signal, with greater delay scattering in the received components, attenuations and strong reduction in the coherence band at the points most affected by vegetation.

Keywords: Mobile Radio Channel, 5G, Path Loss, Channel Impulse Response, Line of Sight, Power Delay Profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O canal de rádio móvel como função da posição e do tempo.....	7
Figura 2 - Decaimento do sinal em pequena e em larga escala.	10
Figura 3 - Divisões de uma parede e relação de visibilidade.	13
Figura 4 - Árvore de visibilidade.....	14
Figura 5 - Acesso OFDM no domínio do tempo e da frequência.....	17
Figura 6 - Região de estudo e azimutes analisados.	20
Figura 7 - Visão 3D da região estudada.	22
Figura 8 - Mapa da região estudada, com destaque para o transmissor.	23
Figura 9 - Diagrama de radiação da antena do setor 1.	24
Figura 10 - Diagrama de radiação da antena do setor 2.	24
Figura 11 - Diagrama de radiação da antena do setor 3.	25
Figura 12 - Situação de visada na região de estudo.....	27
Figura 13 - Situação de visada ao longo de cada radial.....	28
Figura 14 - Perda de Percurso para a antena do setor 1.....	29
Figura 15 - Perda de Percurso para a antena do setor 2.....	29
Figura 16 - Perda de Percurso para a antena do setor 3.....	30
Figura 17 - Perda de Percurso e altura das obstruções em função da distância no AZ1.	31
Figura 18 - Perda de Percurso e altura das obstruções em função da distância no AZ2.	32
Figura 19 - Perda de Percurso e altura das obstruções em função da distância no AZ3.	33
Figura 20 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -90dBm, para o setor 1.	34
Figura 21 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -100 dBm, para o setor 1.	34
Figura 22 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -90dBm, para o setor 2.	35
Figura 23 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -100 dBm, para o setor 2.	35
Figura 24 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -90dBm, para o setor 3.	36
Figura 25 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -100 dBm, para o setor 3.	36
Figura 26 - Distribuição Cumulativa de Probabilidade para cada setor da antena.....	37
Figura 27 - CIR na radial de 50°, a 500 m do transmissor.....	39
Figura 28 - CIR na radial de 50°, a 1000 m do transmissor.....	39
Figura 29 - CIR na radial de 50°, a 1500 m do transmissor.....	40
Figura 30 - CIR na radial de 180°, a 500 m do transmissor.....	42
Figura 31 - CIR na radial de 180°, a 1000 m do transmissor.....	42
Figura 32 - CIR na radial de 180°, a 1500 m do transmissor.....	43

Figura 33 - CIR na radial de 300°, a 500 m do transmissor.....	45
Figura 34 - CIR na radial de 300°, a 1000 m do transmissor.....	45
Figura 35 - CIR na radial de 300°, a 1500 m do transmissor.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências de 5G e principais aplicações.	15
Tabela 2 - Tamanho do CP de acordo com o SCS.	18
Tabela 3 - Coordenadas do polígono em graus decimais.	20
Tabela 4 - Coordenadas do local da antena, em graus decimais.	21
Tabela 5 - Parâmetros de Instalação do Transmissor.	21
Tabela 6 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 50°) com o limiar de recepção de -90 dBm.	41
Tabela 7 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 50°) com o limiar de recepção de -100 dBm.	41
Tabela 8 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 180°) com o limiar de recepção de -90 dBm.	44
Tabela 9 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 180°) com o limiar de recepção de -100 dBm.	44
Tabela 10 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 300°) com o limiar de recepção de -90 dBm.	47
Tabela 11 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 300°) com o limiar de recepção de -100 dBm.	47

Lista de Siglas e Abreviações

AM	<i>Amplitude Modulation</i> – Modulação em Amplitude
FM	<i>Frequency Modulation</i> – Modulação em Frequência
IoT	<i>Internet of Things</i> – Internet das Coisas
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
MHz	Mega Hertz
GHz	Giga Hertz
ISI	<i>Intersymbolic Interference</i> - Interferência Intersimbólica
ICI	<i>Intercarrier Interference</i> – Interferência entre subportadoras
QoS	<i>Quality of Service</i> – Qualidade do Serviço
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
5G	Sistema de Telefonia Móvel de 5ª Geração
LOS	<i>Line of Sight</i> – Linha de Visada
ERB	Estação Rádio Base
DPM	<i>Dominant Path Model</i> – Modelo do Caminho Dominante
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> – União Internacional de Telecomunicações
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FDC	Função de Distribuição Cumulativa
RT	<i>Ray Tracing</i> – Traçado de Raios
IRT	<i>Intelligent Ray Tracing</i> – Traçado de Raios Inteligente
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> – Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequências
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i> – Acesso Múltiplo por Divisão Ortogonal de Frequências
WLAN	<i>Wireless Lan</i> – Rede Local Sem-Fio
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
NLOS	<i>Non-Line of Sight</i> – Fora da Linha de Visada
B _c	<i>Coherence Bandwidth</i> – Banda de Coerência
CP	<i>Cyclic Prefix</i> - Prefixo Cíclico

RB

Resource Blocks - Blocos de Recursos

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2. Organização do Trabalho.....	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Canal de Rádio Móvel	5
2.2. Parâmetros de Análise de Canal	6
2.2.1. Resposta ao Impulso do Canal.....	7
2.2.2. Espalhamento de Retardo de Multipercurso.....	8
2.2.3. Largura de Banda de Coerência.....	9
2.2.3. Perda de Percurso	10
2.3. Modelos de Predição de Canal	12
2.3.1. Traçado de Raios Inteligente	12
2.4. Redes Móveis 5G.....	15
2.4.1. Frequências de Operação das Redes Móveis 5G.....	15
2.4.2. Comunicações OFDMA	16
3. Procedimentos.....	19
3.1. Obtenção da base de Dados	19
3.2. Descrição das Simulações	21
4. Resultados das Simulações	26
4.1. Situação de Visada (LOS)	26
4.2. Perda de Percurso	28
4.3. Potência	33
4.3. Perfil de Atraso de Potência do Canal	38
4.3.1. Resposta ao Impulso.....	Erro! Indicador não definido.

5. Conclusões	48
Referências	50

1. INTRODUÇÃO

Desde os seus primórdios, a humanidade sempre buscou maneiras de se comunicar. Um dos marcos de maior importância na sua história foi o surgimento da escrita, cujos primeiros registros são datados por volta de 4000 a.C., marcando o fim da Pré-História e início da Idade Antiga. Com o passar dos anos, veio também a necessidade de levar as informações de forma cada vez mais rápida de um lugar para o outro, e assim, as formas de se comunicar foram aprimoradas.

Em 1897, após as descobertas de Maxwell sobre as ondas eletromagnéticas, Guglielmo Marconi demonstrou a capacidade do rádio de fornecer contato contínuo com navios navegando pelo canal inglês [1]. Desde então, vem surgindo cada vez mais aplicações para as comunicações sem fio, utilizando ondas de rádio, como é o caso da televisão, dos celulares e computadores portáteis, entre outros.

Apesar dos aparelhos de telefonia móvel fazerem parte do dia a dia de muitas pessoas atualmente, de modo que parece que eles sempre existiram, eles passaram por muitas transformações para chegarem à forma como são utilizados hoje. Em 1934, nos Estados Unidos, eram adotados sistemas de rádio da polícia, e contavam com 194 sistemas municipais e 58 estações estaduais que utilizavam modulação AM (Modulação em Amplitude). Em 1935, Edwin Armstrong demonstrou a modulação em frequência (FM) pela primeira vez e desde o final dessa década, essa tem sido uma das principais técnicas de modulação utilizadas no mundo [1]. Durante a Segunda Guerra Mundial as comunicações sem fio sofreram um grande avanço, como acontece com muitas tecnologias em tempos de guerra, obtendo maiores alcances e mais tempo de conversação, por exemplo.

Desde o final da primeira década do século XXI, constata-se uma rápida evolução na tecnologia dos dispositivos sem fio e uma crescente demanda por conexões de banda larga. No ano de 2021 já é possível o acesso a conteúdo de áudio, vídeo e jogos por meio de serviços de *streaming*, dados os avanços nas redes de comunicação, onde já se pode contar com conexões mais rápidas e confiáveis. Nesse contexto, as redes de comunicações móveis vem ganhando destaque como uma das principais provedoras de acesso à internet banda larga [2]. O tráfego de dados móveis, por exemplo, cresceu 17 vezes em 5 anos (até 2019) e a velocidade de conexão tende a triplicar em 2023, em comparação com 2018 [3], [4]. Esses avanços possibilitam que o acesso sem fio não seja utilizado apenas para conectar pessoas, mas qualquer coisa que traga benefícios por estar conectada [5]; é a chamada Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*).

Diante desse cenário, as redes de Internet Móvel tendem a sofrer uma grande transformação para atender às necessidades dos usuários por conexões, baixa latência e maior segurança na rede. Para isso, vem sendo desenvolvida e implementada a 5ª geração de rede móvel celular, chamada de 5G. Em [5] é mostrado que o acesso sem fio de última geração deve garantir latência da ordem de 1 ms (milissegundo) ou menos, destinada a aplicações de missão crítica; oferecer confiabilidade com ordens de magnitude superiores à atual e ter capacidade para dezenas de bilhões de dispositivos e sensores de baixo custo conectados e com baixo consumo de energia. Na prática, o 5G deve fornecer conectividade ilimitada, rede sustentável, impulsionar a IoT massiva e crítica e acelerar a transformação digital dos setores da indústria [6].

Em fevereiro de 2020 a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) aprovou a proposta de Edital de Licitação das faixas de radiofrequência que permitirão a implantação da tecnologia 5G no Brasil, e as faixas a serem leiloadas são as de 700 MHz, 3500 MHz, 2300 MHz e 26 GHz [7]. O leilão das faixas de frequência foi realizado em novembro de 2021, contando com a participação das principais operadoras de telefonia móvel do país e algumas empresas que são novas no setor [8]. O conhecimento das faixas de frequências a serem utilizadas é de grande importância por possibilitar a realização de experimentos e simulações sobre o comportamento do sinal em diferentes tipos de canal, a fim de se oferecer uma melhor infraestrutura para os usuários.

Outro aspecto de grande importância no projeto de uma rede sem fio é o conhecimento das características do canal onde se deseja trabalhar, pois o desempenho de um sistema de comunicação sem fio depende de maneira fundamental do canal de rádio móvel [9]. A partir do conhecimento das características do canal é possível o desenvolvimento de métodos para correção de distorções do sinal, como o projeto de equalizadores, que combatem a ISI (Interferência Intersimbólica), originada a partir de cópias de multipercurso, e promover maiores taxas de transferência de dados e qualidade de serviço (QoS – Quality of Service) [10]. O canal de rádio móvel tem características que dificultam a transferência de informação entre dois pontos, muito mais do que um canal de transmissão guiado, como no caso das fibras ópticas e cabos metálicos.

Para prever o desempenho de um rádio enlace, existem *softwares* e equipamentos de medição capazes de obter características específicas do canal, como a resposta ao impulso, o perfil de atraso de potência, a perda de percurso, a situação de visada, entre outros. Com a obtenção desses dados, é possível realizar a emulação do canal de rádio móvel em laboratório e analisar quais os tipos de desvanecimentos apresentados por ele, que mais afetarão o sinal

nesta região. Com isso, podem ser realizados procedimentos na transmissão a fim de minimizar esses efeitos.

Neste trabalho foram utilizados os *softwares* Proman e Wallman, da suíte Winprop, desenvolvidos pela Altair Hyper Works, que permitem a criação de uma base de dados com as informações das construções e da vegetação de uma região determinada pelo usuário, e ainda, a simulação do enlace de rádio, a partir de modelos de predição de canal existentes, que atendem à diferentes propostas. As simulações fornecem resultados da perda de percurso, potência do sinal na região, resposta ao impulso do canal, espalhamento de atraso de potência e ainda a situação de visada. Esses resultados são apresentados em um mapa da região total, ou em gráficos que mostram os comportamentos ao longo de uma linha, por exemplo.

Para estudar esses efeitos na faixa de frequências a ser ocupada com o 5G numa área com vegetação, este trabalho busca a caracterização do canal de rádio móvel no bairro Castelo Branco, em João Pessoa, Paraíba, com os parâmetros já citados, na frequência de 3500 MHz. O local escolhido conta com uma forte presença de vegetação e regiões preservadas de Mata Atlântica, na Mata do Buraquinho, e arredores da UFPB (Universidade Federal da Paraíba), que causam forte atenuação no sinal. A obtenção dos principais parâmetros de um canal com essas características não é uma tarefa tão simples, pois para resultados mais precisos, ainda devem ser levados em consideração variáveis sazonais, como a quantidade de folhagem nas árvores, quantidade de chuvas e forças dos ventos [11]. Aqui, esses fatores não foram levados em consideração.

Para a obtenção dos resultados, foram realizadas simulações nos *softwares* Proman e Wallman, da suíte Winprop, utilizando o modelo de traçado de raios inteligente (IRT – *Intelligent Ray Tracing*). Este modelo realiza um pré-processamento da base de dados a fim de reduzir o custo computacional das simulações posteriores, e oferece resultados bastante satisfatórios.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar o canal de rádio móvel no bairro do Castelo Branco em João Pessoa, Paraíba, quanto à de perda de percurso, situação de visada e resposta ao impulso do canal, a fim de verificar o comportamento do sinal de 5G na frequência de 3500 MHz, utilizando o Modelo de Traçado de Raios Inteligente (IRT).

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar simulações nos *softwares* Proman e Wallman, da suíte Winprop com a base de dados do bairro Castelo Branco, em João Pessoa, Paraíba;
- b) Obter os seguintes dados característicos do canal: resposta ao impulso, perda de percurso e situação de visada e obstrução;
- c) Utilizar os valores de Resposta do Impulso do Canal para calcular os parâmetros de dispersão de tempo do canal;
- d) Documentar os trabalhos realizados através da publicação de artigos e da defesa de dissertação.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao trabalho, com um breve histórico das comunicações sem fio, chegando ao 5G, a relevância desse estudo para os projetos de comunicações móveis de 5ª geração, e os objetivos a serem atingidos através dele.

O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos sobre o canal de rádio móvel, descrevendo os principais parâmetros de análise e descrição do canal, os modelos de predição utilizados no trabalho e as frequências destinadas para o 5G.

O Capítulo 3 apresenta os procedimentos realizados nas simulações: a escolha e demarcação da região a ser estudada, a coleta da base de dados das construções, o detalhamento da topografia do terreno, e a descrição das simulações realizadas no *software* WinProp.

No Capítulo 4, são exibidos os resultados obtidos através das simulações via *software*, para a situação de visada (LOS – *Line of Sight*), perda de percurso e resposta ao impulso do canal, em três azimutes padrão para sistemas de telefonia móvel: 50°, 180° e 300°.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais com as principais conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CANAL DE RÁDIO MÓVEL

O canal de rádio móvel é o meio por onde as ondas de rádio irão se propagar entre a estação base e o equipamento do usuário de um sistema de comunicações móveis. Fenômenos típicos de ondas como difração, espalhamento, reflexão e absorção levam à difusão da onda transmitida em um conjunto de ondas parciais com diferentes amplitudes e fases [12]. Esse conjunto de cópias do sinal com diferentes aspectos é chamado de componentes de caminho múltiplo (ou de multipercurso) e, na recepção, a composição delas podem tanto amplificar o sinal recebido como atenuar profundamente, dependendo das características típicas do canal de propagação.

Os multipercursos no canal criam efeitos de atenuação em pequena escala – mudanças rápidas na intensidade do sinal em pequenas distâncias. Segundo [1], os três efeitos mais importantes são:

- Mudanças rápidas na intensidade do sinal, em uma pequena distância ou intervalo de tempo;
- Modulação de frequência aleatória causadas por mudanças *Doppler* em diferentes sinais de caminho múltiplo;
- Dispersão de tempo (ecos) causada por atrasos de propagação de caminho múltiplo.

Em ambientes urbanos, dificilmente a estação móvel estará em linha de visada direta com a estação base, devido aos efeitos da altura na qual a ERB está instalada. Assim, o sinal entregue à estação móvel sofrerá interferência de componentes de multipercurso do sinal, que se somam vetorialmente ao chegar no receptor, podendo atenuar ou distorcer o sinal [1]. Em canais de altas frequências, o desvanecimento de multipercurso causa ainda o espalhamento de retardo de tempo, que limita a taxa de símbolo máxima, e o desvanecimento seletivo em frequência, que atenua o sinal em determinadas frequências do canal de comunicação [13].

O desvanecimento em larga escala pode ser descrito pelos espalhamentos dos ângulos de entrada e de partida e pelo espalhamento de retardo, em adição às perdas de percurso e efeitos de sombreamento [14]. As situações de desvanecimento em pequena e em larga escala são chamadas de características espaço-temporais do canal [2].

A transmissão de dados se dá através das faixas de frequência do espectro eletromagnético, que são atribuídas para diferentes tipos de aplicações. O intervalo de frequências ocupado por um sinal é chamado de largura de banda do sinal. Cada tipo de aplicação conta com um intervalo em frequência, o qual é dividido em canais, que ocupam

faixas de frequência menores, e possibilitam várias conexões simultâneas com a estação base, sem interferência entre elas. Os canais de banda larga contam com uma maior capacidade de transferência de dados e vem sendo destinados a aplicações que possuem essa demanda, como as redes 4G e 5G de telefonia móvel.

Quando o sinal transmitido tem uma largura de banda muito maior que a largura de banda do canal, então a estrutura de caminho múltiplo é completamente resolvida pelo sinal, a qualquer momento, pois o espalhamento de retardo do sinal será menor do que o tempo de guarda fornecido pelo canal, e a potência recebida varia muito pouco, pois as amplitudes de caminho múltiplo individuais não mudam rapidamente em uma área pequena [1]. Porém, se o sinal tem uma banda estreita (como em banda básica, onde a duração do sinal é maior do que o limite de atraso entre as componentes que chegam no receptor), os caminhos múltiplos não serão resolvidos pelo sinal recebido [1]. Assim, sinais de banda larga oferecem maior qualidade ao sinal que chega no receptor.

A vegetação também influencia o sinal que transita entre a BS (*Base Station*) e a unidade móvel receptora. Em [15] é dito que quando o sinal passa sobre a copa das árvores, ele tende a ser mais atenuado do que quando é transmitido a partir de uma antena na altura dos troncos das árvores e ainda que, em frequências da ordem de GHz, uma única grande árvore pode causar até 10 dB de atenuação no sinal. Em [16] foi realizado um experimento na faixa de 700 MHz, para analisar o tipo de influência da vegetação em sinais que operem nessa banda, e foi constatado que a vegetação além da atenuação de cerca de 10 dB no sinal, existe uma dispersão significativa de tempo: o tempo de dispersão do sinal foi de 2,5 a 6 vezes maior do que valores medidos em situações parecidas, sem a influência da vegetação; no trecho com mais influência da copa das árvores esse valor foi de 29 a 41,1 vezes.

2.2. PARÂMETROS DE ANÁLISE DE CANAL

O desempenho de um sistema de comunicação sem fio depende fundamentalmente do conhecimento das características do canal. Portanto, a identificação e a caracterização do canal na faixa das micro-ondas são essenciais para a comunicação de dados através do espectro em termos de cobertura de rádio e restrições de taxa de dados ao desenvolver um sistema de comunicação, pois essa identificação e caracterização são utilizadas para mitigar o comprometimento do canal [13], [17]. Alguns dos principais parâmetros de análise e caracterização do canal são: resposta ao impulso do canal, perda de percurso e espalhamento de retardo de multipercurso, que serão detalhados a seguir.

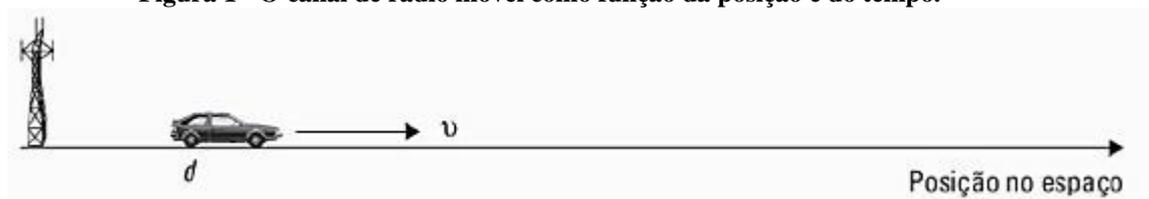
2.2.1. Resposta ao Impulso do Canal

A resposta ao impulso é uma caracterização de canal de banda larga e contém todas as informações necessárias para simular ou analisar qualquer tipo de transmissão de rádio pelo canal, ao relacionar um ambiente físico de propagação e sua influência na transmissão do sinal [1], [12]. O canal pode ser visto como um filtro linear, porém, com um comportamento tipicamente variante no tempo. Assim, as características do filtro equivalente também devem refletir esse comportamento [18].

As ondas que saem do transmissor interagem com inúmeras superfícies irregulares por difrações, espalhamento, reflexões, refrações e absorções, criando um grande número de ondas espalhadas [12], que leva a diferentes instantes de chegada da mesma componente. As pequenas variações de um sinal de rádio móvel podem estar relacionadas diretamente à resposta ao impulso do canal de rádio da estação móvel [1], e por isso, conhecer a resposta ao impulso do canal permite um modelamento mais confiável do sistema de comunicação sem fio a ser implementado nele.

As medições de resposta de impulso do canal no domínio do tempo residem no fato de que a duração do impulso é consideravelmente menor que a diferença entre o tempo de chegada de dois componentes de caminhos múltiplos mais próximos, permitindo, assim, sua identificação adequada [17]. A Resposta ao Impulso do Canal pode ser obtida ao se modelar o canal de rádio móvel como um sistema linear variante no tempo. Esta variação no tempo ocorre devido à movimentação do receptor, do comprimento de onda da portadora e do processo de espalhamento [12]. A Figura 1 mostra o canal de rádio móvel como função do deslocamento do receptor e do tempo.

Figura 1 - O canal de rádio móvel como função da posição e do tempo.



Fonte: [1].

Se a posição do transmissor se mantém fixa e o receptor móvel está em movimento, pode-se considerar que a resposta ao impulso do canal deverá ser uma função da posição do receptor, expressa por $h(d, t)$ – sendo d a distância entre o móvel e a estação base. Como o receptor se move ao longo do solo com velocidade v , a distância entre a estação base e o receptor pode ser expressa por (1):

$$d = v \cdot t \quad (1)$$

Deste modo, temos que o sinal recebido $y(t)$ pode ser obtido através da convolução entre o sinal $x(t)$ (transmitido) e a resposta ao impulso do canal $h(t)$, apresentada na Equação 2:

$$y(v, t, t) = x(t) \otimes h(v, t, t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) \cdot h(v, t, t - \tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

A variável t representa as variações do tempo devidas ao movimento, e τ representa o atraso de caminho múltiplo do canal para um valor fixo de t [1]. Considerando o sistema causal, tem-se que $h(v, t) = 0$ para $t < 0$. Se a velocidade v for constante em um intervalo de tempo determinado, tem-se que a resposta ao impulso do canal é uma equação em função do tempo t .

As componentes de caminho múltiplo, por percorrerem diversos caminhos, apresentam, ao chegar no receptor, diferenças de amplitude, fase, atrasos e até diferentes ângulos de incidência. A função de transferência que descreve a resposta ao impulso do canal deve possuir todos esses fatores para a obtenção de resultados mais precisos.

2.2.2. Espalhamento de Retardo de Multipercurso

Para detalhar o perfil de atraso de potência (*power delay spread*) de um canal, é preciso encontrar alguns parâmetros de atraso, calculados a partir dos dados obtidos na resposta ao impulso do canal. É útil separar o eixo de atraso de caminho múltiplo τ em segmentos de atraso com tempos iguais, os *blocos de atraso em excesso*, onde cada bloco tem uma largura de atraso igual a $\tau_{i+1} - \tau_i$, e τ_0 representa o primeiro sinal que chega ao receptor, com atraso igual a 0 [1]. Assim, a largura do bloco de atraso de tempo, $\Delta\tau$, é dada por $\tau_1 - \tau_0$, e o número total de componentes de multipercurso que chegam, incluindo o primeiro, é representado por N [1].

O atraso em excesso (*delay spread*) é o atraso relativo do i -ésimo componente de caminho múltiplo comparado com o primeiro componente que chega e é dado por τ_i . Já o máximo atraso em excesso do canal é dado por $N\Delta\tau$ [1]. Alguns parâmetros como o atraso médio em excesso ($\bar{\tau}$), a difusão do atraso *rms* e a difusão do atraso em excesso (X dB) que podem ser determinados para um perfil de atraso de potência, auxiliam na comparação de diferentes canais de caminho múltiplo e no desenvolvimento de diretrizes que quantifiquem esses canais [1].

A média do atraso em excesso é o atraso médio de propagação das componentes em relação à primeira componente que chega ao receptor, e é definido como [1][19]:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3)$$

Onde:

$\bar{\tau}$: média do atraso em excesso;

$P(\tau_k)$: a potência da k-ésima componente de multipercurso;

τ_k : atraso de chegada da k-ésima componente de multipercurso com relação à primeira componente que chega no receptor.

O espalhamento do atraso *rms* (σ_t) caracteriza o desvio padrão dos retardos de multipercurso, e em sistemas digitais provoca interferência intersimbólica (ISI), limitando a taxa de símbolos máxima a ser utilizada no canal [19]. Esse parâmetro é dado pela raiz quadrada do segundo momento central do perfil de atraso de potência, e é definido como [1], [20]:

$$\sigma_t = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (4)$$

Em que:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (5)$$

As Equações 4 e 5 não contam com o nível de potência absoluto $P(\tau)$, somente com as amplitudes relativas das componentes de caminhos múltiplos dentro de $P(\tau)$. O espalhamento do atraso *rms* e a média do atraso em excesso são definidos a partir de um único perfil de atraso de potência, que é a média temporal ou espacial das medições de resposta ao impulso consecutivas, coletadas, e com a média calculada em uma área [1].

O máximo atraso em excesso (X dB) é definido como o atraso de tempo durante o qual a energia do caminho múltiplo cai para X dB abaixo do máximo, dado por $\tau_x - \tau_0$, onde τ_0 é o primeiro sinal que chega e τ_x é o atraso máximo que uma componente de caminho múltiplo está a X dB da componente mais forte que chega (não necessariamente a primeira) [1]. Esse valor, em dB, não pode ter níveis muito baixos, pois pode acabar por acrescentar ruídos às componentes de multipercursos, ocasionando erros de medição.

2.2.3. Largura de Banda de Coerência

A largura de banda de coerência (B_c) é um parâmetro a partir do qual se pode quantizar a largura de banda do canal [20]. A B_c é uma relação definida, derivada do espalhamento de atraso *rms*. É uma medida estatística da faixa de frequências sobre as quais o canal poder ser

considerado plano, isto é, ele consegue passar todos os componentes espectrais com ganho praticamente uniforme e fase linear [1].

As componentes situadas dentro da banda de coerência terão uma alta correlação, ou seja, é muito provável que os efeitos impostos pelo canal sejam os mesmos para ambas as frequências [19]. Se for considerada uma correlação de frequências maior do que 90%, a banda de coerência é estimada pela equação (6). Caso não se necessite de uma correlação tão alta, a banda de coerência pode ser calculada através da equação (7), considerando-se uma correlação acima de 50%.

$$Bc = \frac{1}{50 * \sigma_\tau} \quad (6)$$

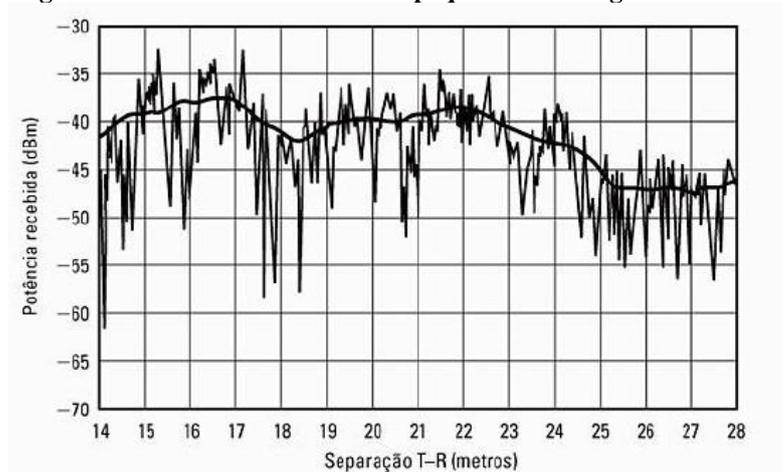
$$Bc = \frac{1}{5 * \sigma_\tau} \quad (7)$$

A Banda de Coerência do canal é uma função da resposta ao impulso do canal específico e sinais aplicados, e essas equações são apenas estimativas aproximadas. As técnicas de análise espectral e simulações são exigidas para determinar o impacto exato que o caminho múltiplo variável no tempo tem sobre um sinal transmitido em particular [1].

2.2.3. Perda de Percurso

Um dos principais parâmetros de caracterização de canal é a perda de percurso, ou perda de caminho em larga escala, que apresenta um decaimento mais lento no nível médio do sinal do que o que é visto nas perdas em pequena escala (Figura 2). Definida por [21] como a relação entre a potência média do sinal recebido e a potência transmitida.

Figura 2 - Decaimento do sinal em pequena e em larga escala.



Fonte: [2].

A relação entre as potências recebida e transmitida no Espaço-Livre é dada pela Equação de Friis (8) [22];[18], que descreve as perdas de potência em transmissão no espaço livre, onde é assumida uma situação de desobstrução entre as antenas e céu com poucas nuvens, e não são consideradas reflexões no solo nem nas proximidades da antenas. Esse é um parâmetro importante, pois mostra como seria o decaimento da potência ao longo da distância, e em função da frequência. Assim, pode ser comparado com valores simulados ou medidos e apresentado para fins de comparação.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad (8)$$

Onde G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente, λ o comprimento de onda em metros e d , a distância de separação entre o transmissor e o receptor, em metros.

Modelos de grande escala predizem que a intensidade média do sinal recebido decai em função da distância de separação d , d^{-n} , onde n é o expoente de perda por percurso que indica a razão com a qual essa perda aumenta com relação à distância entre transmissor e receptor e varia de 2 a 6, dependendo das características do canal [23], [24]: quanto mais obstruído/urbano, maior o valor de n [21]. Para uma situação com presença de obstáculos, a Equação de Friis pode ser aproximada por (9):

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^n \quad (9)$$

A perda do caminho, medida em dB, pode ou não incluir os ganhos das antenas transmissora e receptora. Quando os ganhos são excluídos, as antenas são consideradas como tendo ganho unitário, e a perda de percurso é dada por (10) [1]:

$$PL(dB) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) \quad (10)$$

Encontrar o valor do parâmetro n é importante para uma caracterização mais completa da perda de percurso do canal. Este parâmetro pode ser encontrado a partir das curvas de perda de caminho, obtidas via *software*, que simulem o comportamento do canal na região que se deseja analisar.

Ao se excluir da equação os parâmetros de transmissão das antenas, como o ganho e a potência de transmissão e de recepção, a equação de Friis para a perda no espaço livre (Lfs) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$Lfs(dB) = 20.\log(D) + 20.\log(f) + 32,45 \quad (11)$$

Onde D é dado em Km e f em MHz.

2.3. MODELOS DE PREDIÇÃO DE CANAL

Modelos de predição de canal são muito utilizados em projetos de sistemas de comunicação sem fio, por serem capazes de simular o comportamento do sinal no canal de rádio móvel onde se deseja trabalhar. Existem modelos empíricos e determinísticos. Os primeiros são baseados em métodos experimentais, obtidos geralmente a partir de campanhas de medições em uma ou mais regiões, modelamento dos resultados obtidos e apresentação do resultado final, fornecendo em alguns casos expressões com valor médio das atenuações [25]. Alguns dos modelos empíricos mais conhecidos são os de Okumura *et al.*, Walfisch-Ikegami, ITU (CCIR) [26], entre outros. Os modelos determinísticos utilizam alguma formulação da teoria eletromagnética, como a Teoria Geométrica da Difração e a Teoria Uniforme da Difração, para realizar os cálculos de cobertura da região, aplicadas em técnicas chamadas de Traçado de Raios Ópticos [25]. Os modelos determinísticos, portanto, exigem um maior custo computacional, e dependendo da aplicação, levam a resultados mais precisos. Existem ainda os modelos semi-determinísticos, que utilizam elementos das duas técnicas e entregam resultados mais confiáveis em diversas situações de propagação, com um custo computacional menor, como é o caso do Modelo do Caminho Dominante [27]. Nesta seção, será detalhado o modelo de predição de canal utilizado no trabalho.

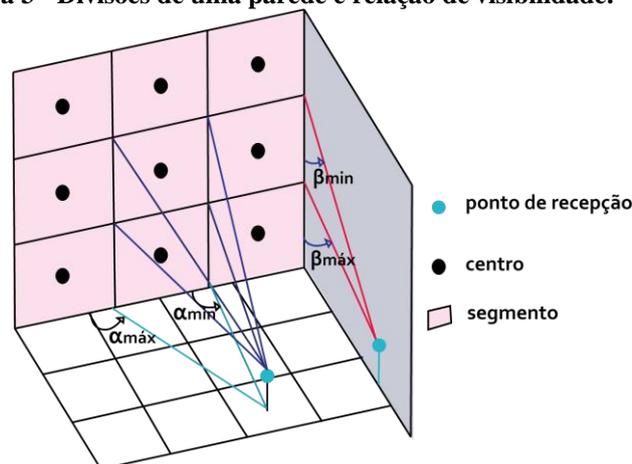
2.3.1. Traçado de Raios Inteligente

Modelos de propagação determinísticos são geralmente baseados em técnicas de traçado de raios ópticos, onde diferentes raios emitidos pela antena são sujeitos à reflexão, espalhamento e difração nas barreiras e bordas das construções [9]. Tais modelos consideram todos esses fenômenos de propagação, bem como os efeitos de guias de onda em ruas de altas construções, e são mais complexos do que os modelos empíricos, levando a um custo computacional mais elevado.

O traçado de raios (RT – *Ray Tracing*) é uma abordagem óptica geométrica que avalia todos os caminhos seguidos pelos raios à medida que eles interagem com o ambiente [28] e se encaixa nos modelos determinísticos, que levam a resultados mais precisos e podem ser utilizados em várias situações, com precisão elevada. Um novo modelo de traçado de raios 3D foi desenvolvido para analisar cenários variantes no tempo, mostrando uma boa confiabilidade, suportando um número arbitrário de reflexões, dispersões e transmissões para cada caminho do raio [29], e funciona com um pré-processamento que reduz em algumas ordens de magnitude, o tempo computacional necessário para as simulações: o Traçado de Raios Inteligente.

A técnica de traçado de raios inteligente (IRT – *Intelligent Ray Tracing*) permite combinar a precisão dos modelos de raios ópticos com a velocidade dos modelos empíricos [30] e o princípio do “pré-processamento da base de dados” é mostrado por [31]: “inicialmente, as paredes da construção ou do obstáculo são divididas em segmentos (reflexões e penetrações) e suas arestas (difrações) em segmentos horizontais e verticais. Feito isto, as condições de visibilidade entre diferentes elementos (possíveis raios) são determinadas e armazenadas em um arquivo”. Para a determinação da visibilidade, cada elemento é representado por seus centros. A Figura 3 mostra a divisão dos elementos, com marcações no centro, e uma antena transmissora.

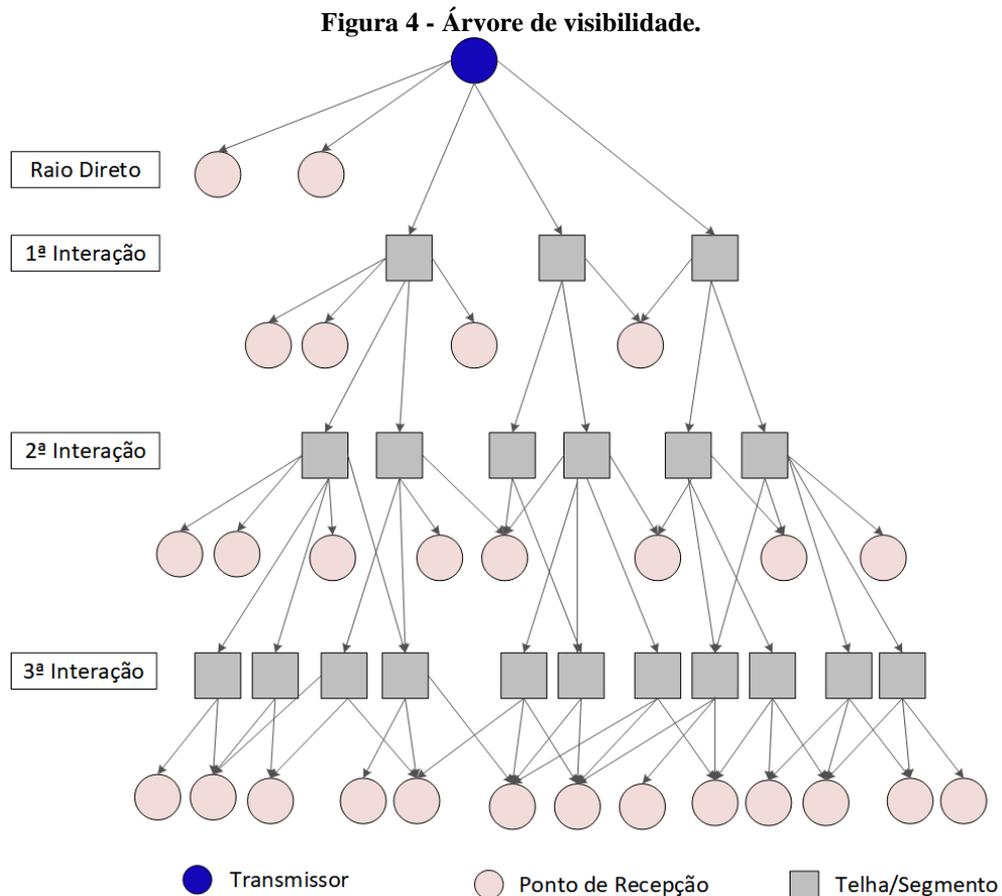
Figura 3 - Divisões de uma parede e relação de visibilidade.



Fonte: [31].

A Figura 4 mostra a árvore de visibilidade, que apresenta possíveis destinos para os raios que saem do transmissor, até 3 interações depois. Para um local diferente do transmissor, apenas os ramos mais altos nesta árvore devem ser computados novamente, isto é, determinar quais elementos estão na linha de visão do transmissor [9]. A partir do ponto do transmissor, todos os blocos e segmentos visíveis são rastreados na estrutura da árvore criada, considerando

as condições do ângulo e esse rastreamento é feito até que um ponto de previsão seja atingido ou um número máximo de interações seja excedido [30].



Fonte: [18].

O traçado de raios 3D calcula todos os raios com o máximo de três interações (reflexos triplos e difrações duplas em combinações arbitrárias) [9]. Um maior número de interações não se faz necessário, pois as componentes apresentam atenuações severas, não alterando de forma significativa os resultados deste algoritmo.

Neste trabalho, foi realizado o pré-processamento da base de dados, e no pós-processamento foi inserida a estação base, cuja localização se manteve fixa em todas as simulações. O modelo do traçado de raios apresenta vários caminhos que o sinal percorre após sair do transmissor, e, por isso, oferece mais parâmetros para a obtenção do perfil de atraso de potência do canal, como: resposta ao impulso com as componentes de caminhos múltiplos, perda de percurso, espalhamento de retardo de multipercursos e ângulo de chegada.

2.4. REDES MÓVEIS 5G

2.4.1. Frequências de Operação das Redes Móveis 5G

As comunicações sem fio estão em constante evolução e contam com cada vez mais aplicações, fazendo-se presente no dia a dia das pessoas através da conexão de dispositivos domésticos, empresariais, urbanos etc. Para dar conta de atender a toda essa demanda, o espectro compreendido até a frequência das micro-ondas (3 GHz) se encontra praticamente todo ocupado, dificultando a implantação de novas aplicações nessas faixas e limitando os avanços possíveis à capacidade de transmissão e ocupação dessas frequências [2]. Por isso, passam a ser consideradas novas faixas de frequência para as redes móveis 5G, incluindo as frequências entre 3 e 6 GHz (FR1) e ainda as chamadas “ondas milimétricas” ou “*mm wave*” (FR2) [32], apresentadas na Tabela 1. Serão utilizadas também as frequências remanescentes da faixa de 700 MHz para aplicações que não necessitam de altas taxas de transmissão.

Tabela 1 - Frequências de 5G e principais aplicações.

Frequências	Aplicação
3,3 até 3,8 GHz 2,3 GHz e 2,6 GHz	Bandas de frequência primárias, com 80 a 100 MHz de banda no canal
4,8 GHz e 4,990 GHz e 3,8 a 4,2 GHz	Complementar as bandas primárias em alguns países específicos
6 GHz	Potencial banda primária do 5G a longo prazo.
24,25 a 27,5 GHz 31,8 a 33,4 GHz 37 a 43,5 GHz 45,5 a 50,2 GHz 50,4 a 52,6 GHz 66 a 76 GHz e 81 a 86 GHz	Ondas milimétricas

Fonte: [33], [34].

As frequências até 6 GHz são utilizadas para possibilitar a internet móvel banda larga de altíssimas velocidades [34]. Frequências mais altas (ondas milimétricas) poderão ser utilizadas para aplicações em medicina e veículos autônomos. Uma tecnologia de transmissão baseada em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência) – técnica bastante utilizada nas comunicações sem fio atualmente – provavelmente continuará sendo uma boa linha de base, embora deva passar por alguns ajustes para corresponder a frequências acima de 10 GHz [5].

São várias as faixas de frequências a serem utilizadas, pois utilizar uma faixa muito ampla não é muito recomendado: impõe restrições à interface da estrutura de rádio, como as características de propagação, aspectos de implementação e, para certas bandas de frequência, a compatibilidade com tecnologias herdadas [5]. Do ponto de vista das antenas, a utilização de antenas de banda estreita fornece maior aproveitamento no desempenho do sistema, pois elas apresentam maior ganho na frequência de operação, do que as antenas de banda larga.

A operação das redes móveis em frequências acima das micro-ondas permite que os canais possuam maior largura de banda, e assim, possam transportar mais informações ao mesmo tempo, resultando em conexões mais rápidas do que nas redes de gerações anteriores. Assim, do mesmo modo como as frequências utilizadas variam de acordo com a aplicação, a largura de banda do canal também é variável. Nas faixas abaixo dos 6 GHz, a largura de banda máxima do canal é de 100 MHz e em ondas milimétricas é de 400 MHz [32].

A frequência de 3,5 GHz, utilizada neste trabalho, apresenta boa compatibilidade com a tecnologia existente atualmente, pois existem aplicações de WLAN e WiMax em faixas próximas a essa. Desse modo, essa faixa traz boas perspectivas para a implantação de 5G, pois além de utilizar os mesmos princípios das tecnologias sem fio atuais, ainda é capaz de fornecer internet móvel de banda larga com velocidades maiores do que as das redes 4G LTE.

2.4.2. Comunicações OFDMA

As comunicações digitais trouxeram avanços na qualidade do serviço oferecido pelas redes sem fio, e dentre eles podem-se citar a melhor eficiência espectral, maiores taxas de transferência e menores latências nas conexões. Essas melhorias foram possibilitadas não apenas pelo uso de frequências mais altas, como também pelas modulações aplicadas, que são capazes de combater alguns dos efeitos que o canal pode causar ao sinal.

Dentre esses efeitos, [35] mostra que “os multipercursos são o problema mais sério encontrado em comunicações sem-fio”, onde uma das principais consequências causadas por eles é a interferência inter simbólica (ISI), que se dá quando um pulso é espalhado além da janela de tempo a ele alocada e acaba invadindo a janela destinada ao próximo pulso. A ISI pode afetar severamente precisão da recepção, e para combatê-la, as principais medidas adotadas são a equalização no receptor e OFDM no transmissor [35].

A multiplexação por divisão ortogonal de frequências é uma técnica que distribui a informação em várias frequências, as subportadoras, que contam com um espaçamento preciso em frequência. A ortogonalidade garante um maior aproveitamento do espectro, ao dispor as

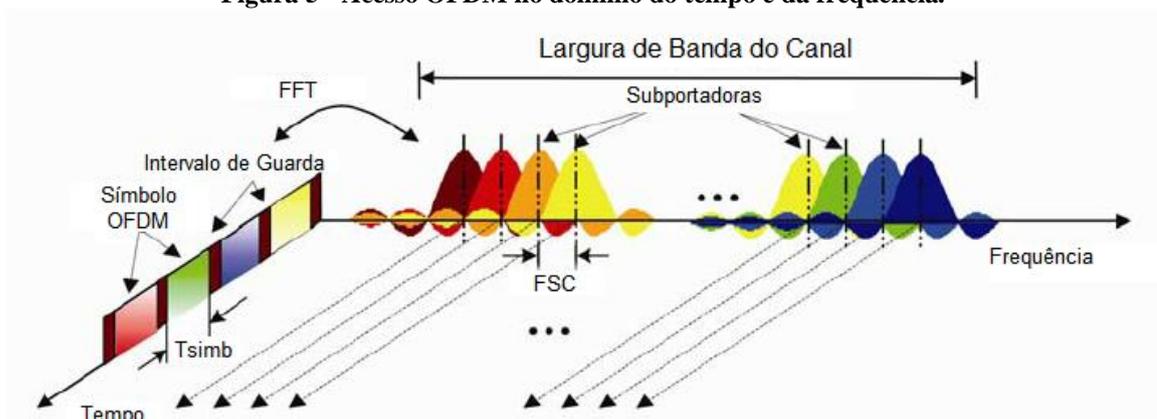
subportadoras espaçadas de 90° entre si. Em [35], Lathi e Ding explicam como a utilização do OFDM reduz a interferência inter simbólica causada pelo multipercurso:

“Com a aplicação da Transformada Discreta Inversa de Fourier nos dados da fonte e da Transformada Discreta de Fourier no vetor de saída do canal, o OFDM converte um canal de ordem L com ISI em N subcanais paralelos sem ISI. Cada subcanal passa a ser apenas um ganho não seletivo em frequência. Não há ISI em cada subcanal. Os N subcanais paralelos são independentes, pois seus ruídos são independentes.”

As redes LTE trabalham com sistema de múltiplas portadoras com acesso OFDM: o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*), que é caracterizado por utilizar modulação OFDM, agrupando as subportadoras de um canal em subconjuntos chamados “*resource blocks*” (blocos de recursos). No 5G o bloco de recursos conta com 12 subportadoras, assim como na geração anterior, porém, até o *LTE-Advanced* se contava sempre com 15 KHz de espaçamento entre elas, e na nova geração, esse valor varia dependendo da largura de banda disponível para o canal [36]. As múltiplas subportadoras são independentes quanto à modulação e, no LTE, elas podem ser moduladas em QPSK, 16 QAM e 64 QAM. Dependendo da aplicação e da disponibilidade espectral, a largura de banda dos canais também pode variar, sendo adotados os valores máximos de 100 MHz para as faixas abaixo dos 6 GHz, e de 400 MHz para as faixas das ondas milimétricas [32], [36].

Na Figura 5, é mostrada a ortogonalidade das subportadoras na modulação OFDM, vistas no domínio da frequência. No domínio do tempo são mostrados os símbolos OFDM, com um intervalo de guarda entre eles, a fim de evitar a interferência inter-simbólica.

Figura 5 - Acesso OFDM no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: [38].

Para combater os desvanecimentos causados pelos multipercursos, além da divisão do sinal em grupos de subportadoras, outra técnica importantíssima permitida pelo OFDM é a introdução do prefixo cíclico (CP – *Cyclic Prefix*) aos dados transmitidos, onde substitui-se os M primeiros elementos do vetor de dados pelos últimos símbolos [35]. Essa técnica também reduz a ICI (*Inter Carrier Interference* – interferência entre portadoras), que se dá quando a ortogonalidade das subportadoras está danificada, afetando a demodulação do lado do receptor.

Para evitar ISI, o prefixo cíclico pode ser inserido entre os símbolos OFDM. Já para reduzir ICI, o CP pode ser inserido no intervalo de guarda [38]. O tamanho do CP varia de acordo com algumas características típicas de cada canal, e para estimá-lo, é de fundamental importância o conhecimento do espalhamento de retardo máximo do canal, pois a duração do tempo de guarda é geralmente maior do que ele. Assim, quanto maior o espalhamento de retardo do canal, maior será o CP. Porém, deve-se procurar conciliar o tamanho do CP com o tamanho do símbolo OFDM, pois símbolos grandes e prefixos cíclicos longos podem gerar muita sobrecarga no sistema [38]. Existem valores padrão para o tamanho do CP de acordo com o espaçamento entre as subportadoras (SCS – *Sub-carrier spacing*), como é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tamanho do CP de acordo com o SCS.

Numerologia (μ)	SCS (KHz)	CP (μs)
0	15	NCP = 4,69
1	30	NCP = 2,34
2	60	NCP = 1,17 ECP = 4,17
3	120	NCP = 0,59
4	240	NCP = 0,29

Fonte: [38].

3. PROCEDIMENTOS

Nesta seção serão descritos os procedimentos utilizados para a obtenção da base de dados da região de estudo, e as simulações realizadas na suíte de *softwares* Winprop, da Altair HyperWorks™. O local de interesse está localizado no Bairro de Castelo Branco, na cidade de João Pessoa, Paraíba, e a base de dados possui dimensões de 3,44 x 3,02 Km, com as informações das construções em 3D, vegetação e topografia. Trata-se de um bairro predominantemente residencial com a presença de algumas edificações mais elevadas, bastante arborizado e circundado pela Mata do Buraquinho, uma reserva florestal de Mata Atlântica, com alta densidade de vegetação e árvores de grande porte, com altura média de 20m.

3.1. OBTENÇÃO DA BASE DE DADOS

Após a determinação da região onde seria realizado o estudo, foi utilizado o *software* Google Earth Pro para demarcar a área das simulações e a localização da antena transmissora. A antena foi inserida no território pertencente à Universidade Federal da Paraíba (UFPB), num ponto onde existem antenas de algumas operadoras de telefonia móvel. As coordenadas do local de instalação foram obtidas através de consulta no site da Anatel [39].

Por limitações do *software*, a simulação não pôde ser realizada com a antena no exato lugar da torre, pois esta é instalada em um lugar demarcado com vegetação, e o *software* não é capaz de simular nesta situação. A Figura 6 mostra a região de estudo e os azimutes considerados nas simulações.

Figura 6 - Região de estudo e azimutes analisados.



Fonte: autoria própria. (Imagem: Google).

O *software* Google Earth Pro apresenta as coordenadas da região e os dados sobre a altura das construções, da vegetação e a elevação do terreno, mas infelizmente, não exporta esses valores. Por isso, o arquivo com as informações da topografia foi obtido no site *Earth Data Search*, da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) [40]. Lá, é possível encontrar diversas informações a partir dos satélites administrados pelo órgão, contendo imagens e diversos tipos de dados sobre hidrografia, desmatamento e topografia, entre outros. As coordenadas do polígono da região delimitada, em graus decimais, são mostradas na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Coordenadas do polígono em graus decimais.

	Latitude	Longitude
SW	-7,153°	-34,867°
NE	-7,126°	-34,835°

Fonte: de autoria própria.

A base de dados com as informações de altura das construções e vegetação foi obtida inicialmente através do site *Open Street Map* [41], mas se tratava de um arquivo incompleto.

Assim, utilizou-se o *software* Wallman, também da suíte Winprop, para adicionar os elementos de construções e de vegetação que estavam ausentes do arquivo inicial, para que assim se pudesse ter uma base de dados mais fiel à realidade, levando a resultados mais precisos.

3.2. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A base de dados da região foi submetida a um pré-processamento, que visa reduzir o custo computacional das simulações e permite a utilização do Modelo de Traçado de Raios Inteligente. Esse modelo de predição de canal foi escolhido por entregar as componentes de multipercurso na Resposta ao Impulso do Canal, permitindo a obtenção do perfil de atraso de potência. O pré-processamento contou com o arquivo da topografia da região, e um outro, contendo as informações das construções e vegetação. Os dois arquivos sobrepostos possibilitam simulações mais próximas da realidade. A Tabela 4 mostra as coordenadas em que foi instalada a antena, em graus decimais.

Tabela 4 - Coordenadas do local da antena, em graus decimais.

Latitude	-7,137850°
Longitude	-34,848520°

Fonte: de autoria própria.

Foram utilizados os diagramas de radiação de uma antena setorizada, com aplicação para WiMax, que opera na frequência de 3500 MHz. Os percursos analisados nas simulações são aqueles mostrados na Figura 6, onde Az_1 , Az_2 e Az_3 correspondem, respectivamente, aos azimutes de 50°, 180° e 300°. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de instalação do transmissor. Não foi considerado *down tilt*.

Tabela 5 - Parâmetros de Instalação do Transmissor.

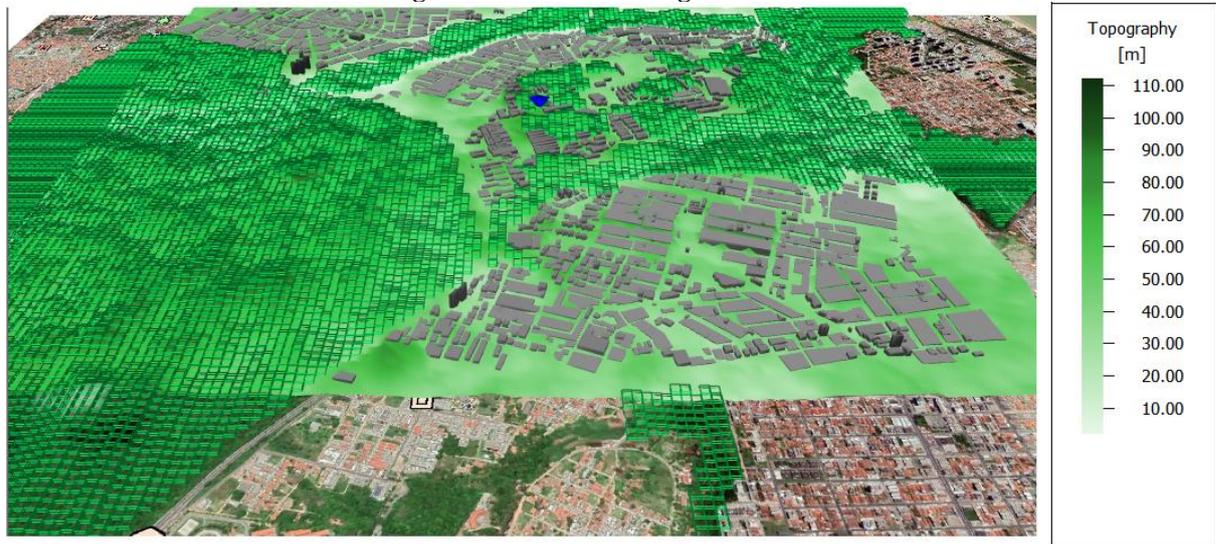
Frequência (MHZ)	3500		
Potência (P.A)	50		
Azimute dos Setores (° NV)	50°	180°	300°
Altura da Antena Transmissora (m)	50	50	50
Altura da Antena Receptora (m)	1,5	1,5	1,5
Ganho da Antena (dBd)	14,86	13,36	13,16

Fonte: de autoria própria.

A Figura 7 apresenta uma visão 3D da região de estudo, unindo a topografia e as construções. A construção da base de dados digital no *software* Wallman se dá da seguinte maneira: inicialmente é inserida uma imagem da região, obtida no *software* Google Earth Pro e georreferenciada no *software* Quantum Gis; em seguida, verifica-se no Google Earth Pro a

altura das construções e da vegetação; e por fim, retorna-se ao Wallman, onde serão desenhados os polígonos em cima da imagem para que fiquem na posição correta. A imagem precisa ser georreferenciada pois no *software* Wallman precisa-se escolher o sistema de coordenadas, e neste caso, foi utilizada a região 25 do hemisfério sul (coordenadas UTM), para que ao inserir o arquivo de topografia, ele coincida com o arquivo da base de dados das construções.

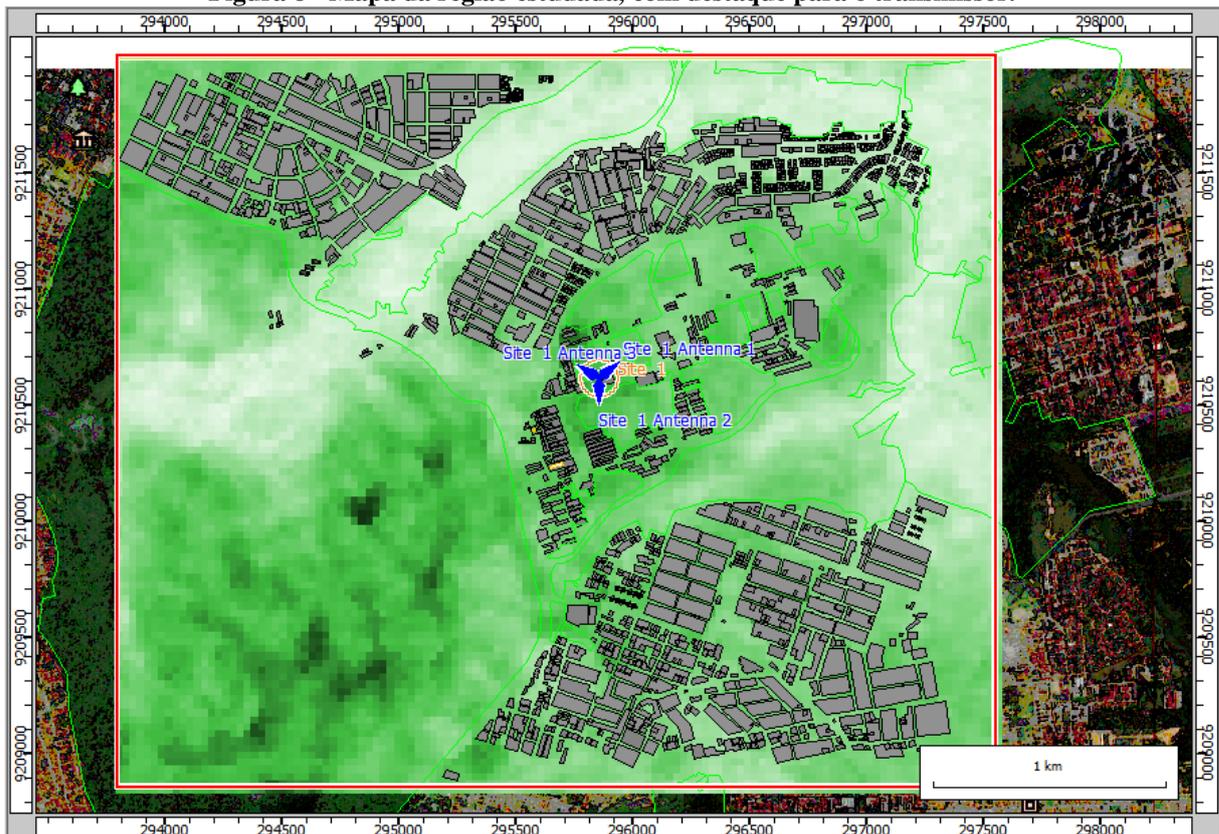
Figura 7 - Visão 3D da região estudada.



Fonte: de autoria própria.

A Figura 8 mostra a região de estudo (em verde), delimitada pelo quadrilátero em vermelho, que foi submetida ao pré-processamento. É mostrado ainda, o local do transmissor e seus três setores, direcionados conforme foi mostrado na Figura 6. O verde no fundo da imagem mostra a topografia da região, tendo as áreas mais escuras como as de maior elevação. Os objetos com contornos verdes representam a vegetação e aqueles em cinza, as construções.

Figura 8 - Mapa da região estudada, com destaque para o transmissor.



Fonte: de autoria própria.

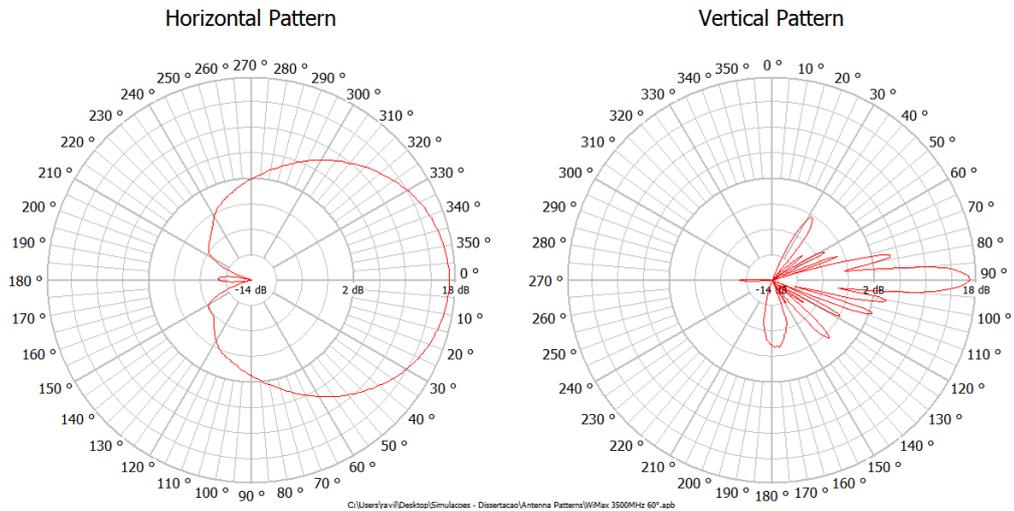
O pré-processamento da base de dados foi feito com a união entre os arquivos de topografia e das construções, no *software* Wallman/Winprop. Como é explicado em [5], o princípio para o pré-processamento da base de dados está no fato de que as informações das construções não mudam, de forma que apenas os raios entre a antena transmissora e os obstáculos primários ou pontos de recepção em linha de visada podem variar, caso a posição do transmissor varie. No caso desta simulação, a posição do transmissor se mantém constante.

O pré-processamento gera um novo arquivo com uma alta quantidade de informações dos raios entre os obstáculos, e tem um custo computacional relativamente alto. O intuito de utilizá-lo está no fato de que ele só precisa ser realizado uma vez, poupando custo computacional nas simulações posteriores. Esse tipo de simulação fornece também a CIR (*Chanel Impulse Response* – Resposta ao Impulso do Canal), que permite traçar o perfil de atraso de potências do canal e caracterizá-lo com maior fidelidade.

Os diagramas de radiação das antenas utilizadas em cada setor são mostrados nas Figuras 9, 10 e 11, exibindo os planos horizontal e vertical. Foram utilizados diagramas de antenas para aplicações de WiMax em 3500 MHz, cujo desempenho se assemelhava ao desejado nesse trabalho. Os diagramas não foram construídos especificamente para essa aplicação e, por isso, não são iguais para os três setores: é possível notar algumas diferenças

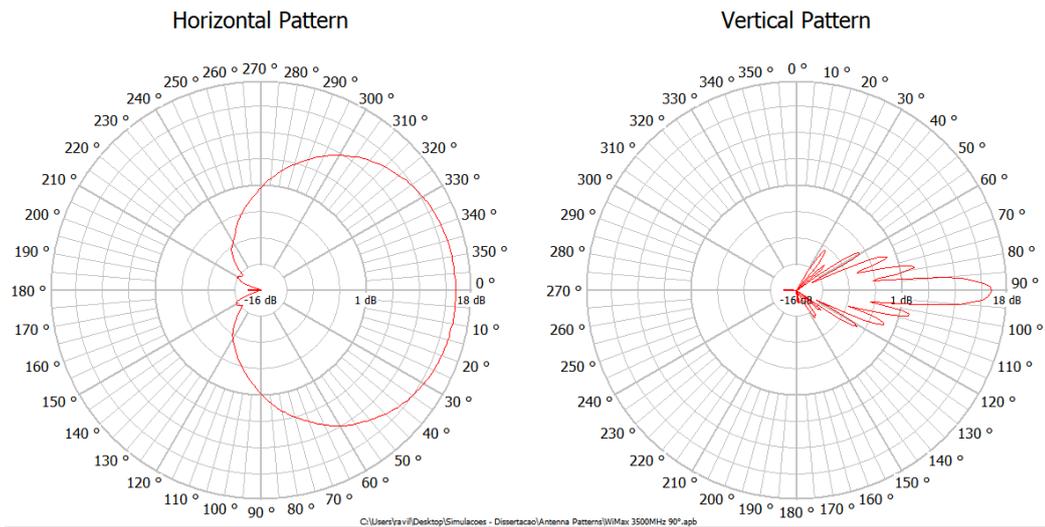
entre eles, quanto à potência máxima, o ângulo de abertura e a relação frente-costas, por exemplo. O Winprop só permite realizar as simulações com a antena setorizada com a adição dos arquivos dos diagramas.

Figura 9 - Diagrama de radiação da antena do setor 1.

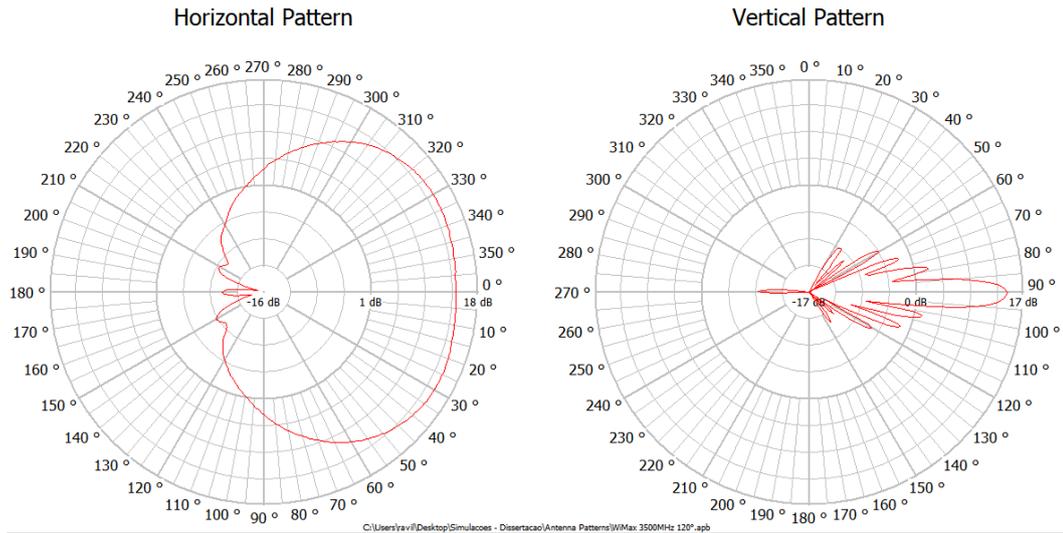


Fonte: de autoria própria.

Figura 10 - Diagrama de radiação da antena do setor 2.



Fonte: de autoria própria.

Figura 11 - Diagrama de radiação da antena do setor 3.

Fonte: de autoria própria.

A utilização de uma base de dados mais fiel, junto do arquivo de topografia e dos parâmetros de transmissão, permite obter resultados muito próximos da realidade, ainda que os diagramas de radiação das antenas não sejam específicos para aplicações de 5G, auxiliando nos estudos de predição de canal e até reduzindo custos de projeto de redes de comunicação sem fio. No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos a partir dessas simulações.

4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as simulações descritas no Capítulo 3, utilizando o modelo de Traçado de Raios Inteligente (IRT). As simulações foram realizadas no *software* Proman, da suíte Winprop, na frequência 3500 MHz, e foram coletados os resultados da perda de percurso, potência, situação de visada e a resposta ao impulso do canal. Os dados foram levados ao MS Excel para tratamento e visualização, antes de serem acrescentados neste trabalho.

Alguns resultados são apresentados para a região como um todo, independente do setor analisado, como a LOS (*Line of Sight*), a CDF (*Cumulative Distribution Function*) e os Caminhos de Propagação. Outros, variam de acordo com o setor da antena desejado, como a Perda de Percurso, a Potência e a Resposta ao Impulso. Dessa forma, para obtenção de cada um desses parâmetros, traçava-se uma linha desde o transmissor até o ponto desejado em cada setor, sobre a qual seria calculado o resultado em função da distância.

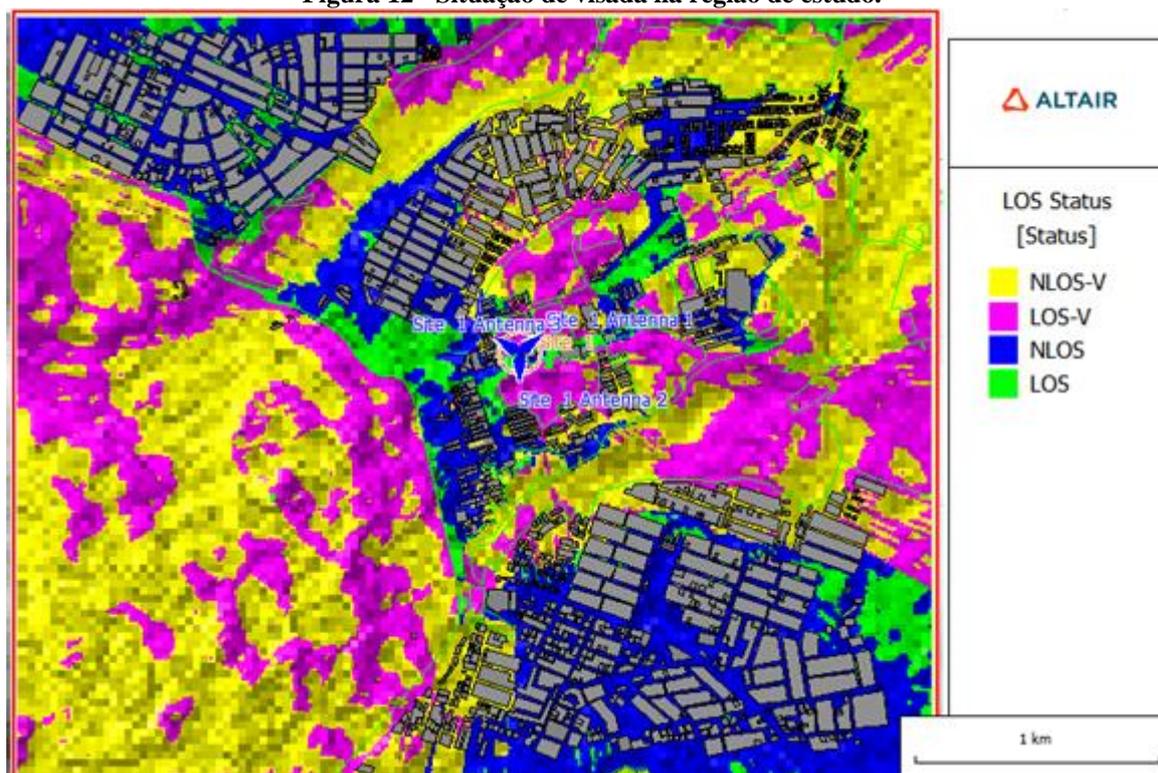
4.1. SITUAÇÃO DE VISADA (LOS)

A situação de visada entre as antenas transmissora e receptora é bastante afetada pela presença de vegetação elevada e/ou difrações, sendo encoberta na maior parte dos pontos calculados. De início, foi realizada a análise da desobstrução da antena, considerando cinco condições, sendo:

- LOS: Linha de visada completamente desobstruída;
- NLOS: Linha de visada completamente obstruída (por edificações ou relevo);
- LOS-V: Linha de visada obstruída apenas por vegetação;
- NLOS-V: Linha de visada obstruída por edificações e vegetação.

A condição de visada entre as antenas transmissora e receptora pode ser verificada na Figura 12. A área em amarelo na figura representa região onde a linha de visada entre as antenas são obstruídas por edifícios, relevo do terreno e ainda pela vegetação. Já em rosa, é mostrada a região cuja linha de visada é obstruída apenas pela vegetação. Essas duas cores são predominantes do mapa, mostrando a grande influência da vegetação nesse canal de rádio móvel.

Figura 12 - Situação de visada na região de estudo.



Fonte: de autoria própria.

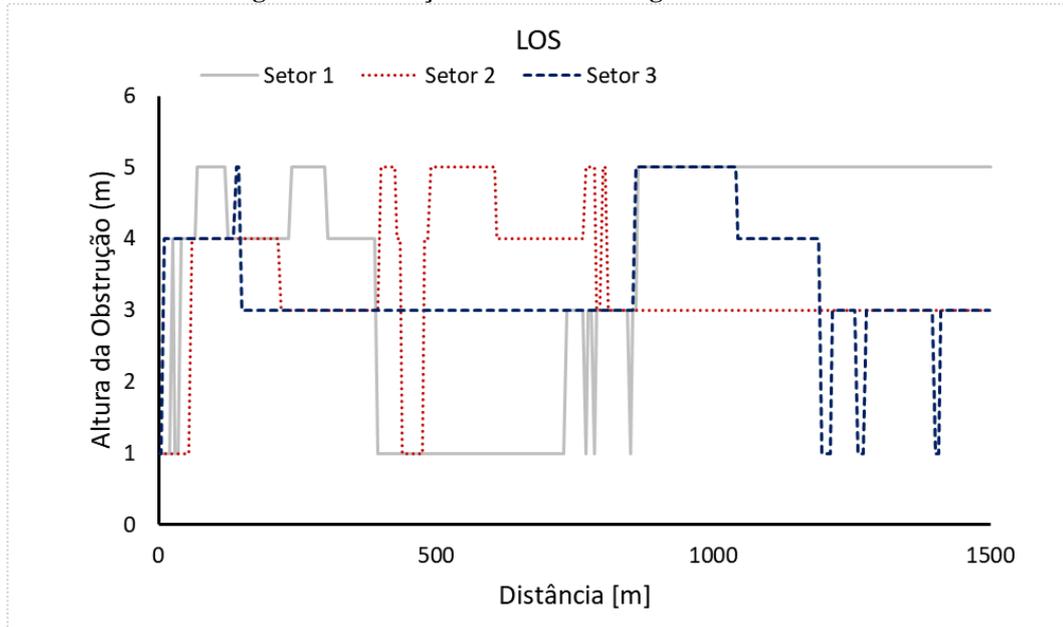
Na Figura 13 é apresentada a situação de visada da linha de frente de cada setor. Nas três direções a obstrução máxima encontrada foi de 5 m de altura, mas o perfil das construções traz bastante diferenças. Ao longo da primeira radial (azimute de 50°), as maiores obstruções são encontradas nos 400 m iniciais, onde a linha de visada direta é obstruída apenas por vegetação, e após os 850 m do transmissor, onde a influência da vegetação é ainda mais acentuada – LOS-V e NLOS-V. O trecho de menor obstrução conta com desobstrução na linha de visada direta, trata-se de uma região descampada, destinada a práticas esportivas na Universidade Federal da Paraíba.

Na direção do segundo setor, há marcante influência da vegetação na linha de visada, que se encontra em situação de LOS-V e NLOS-V ou de NLOS. Esse comportamento se dá pela presença de diferentes tipos de construções que compõem o campus universitário e trechos de vegetação mais elevada, nos 820 m iniciais, a partir do transmissor. Para distâncias maiores, a obstrução é proveniente de construções de pequeno porte, e a visada direta se encontra totalmente obstruída.

O terceiro azimute conta com maiores obstruções nos 155 m iniciais, ocasionadas pelas construções mais elevadas dentro do campus universitário, que irão influenciar a situação de visada ao longo do trecho analisado. Mesmo com a mudança no perfil das construções a situação de visada predominante é de NLOS. Ao longo desse setor como um todo, a linha visada

é pouco afetada pela vegetação, pois essa se encontra em um trecho a cerca de 1000 m do transmissor, no leito do Rio Jaguaribe, região cujo nível do terreno é cerca de 40 m mais baixo que o nível da torre de transmissão. Na seção 4.2 será apresentada a perda de percurso relacionada à situação de visada.

Figura 13 - Situação de visada ao longo de cada radial.

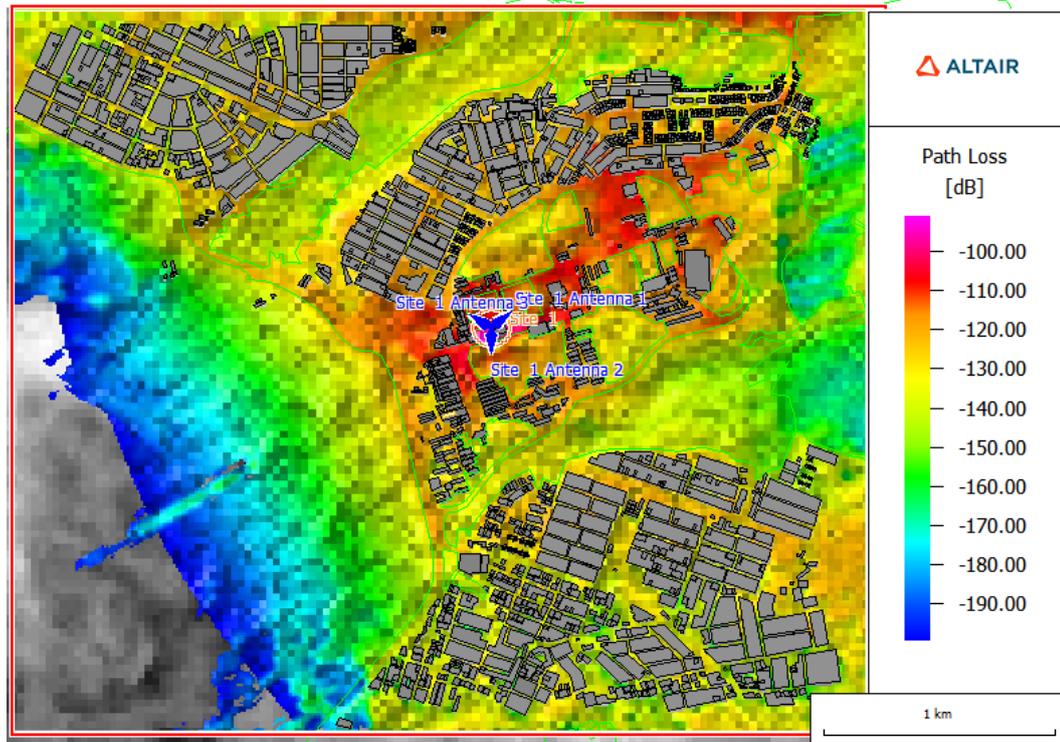


Fonte: de autoria própria.

4.2. PERDA DE PERCURSO

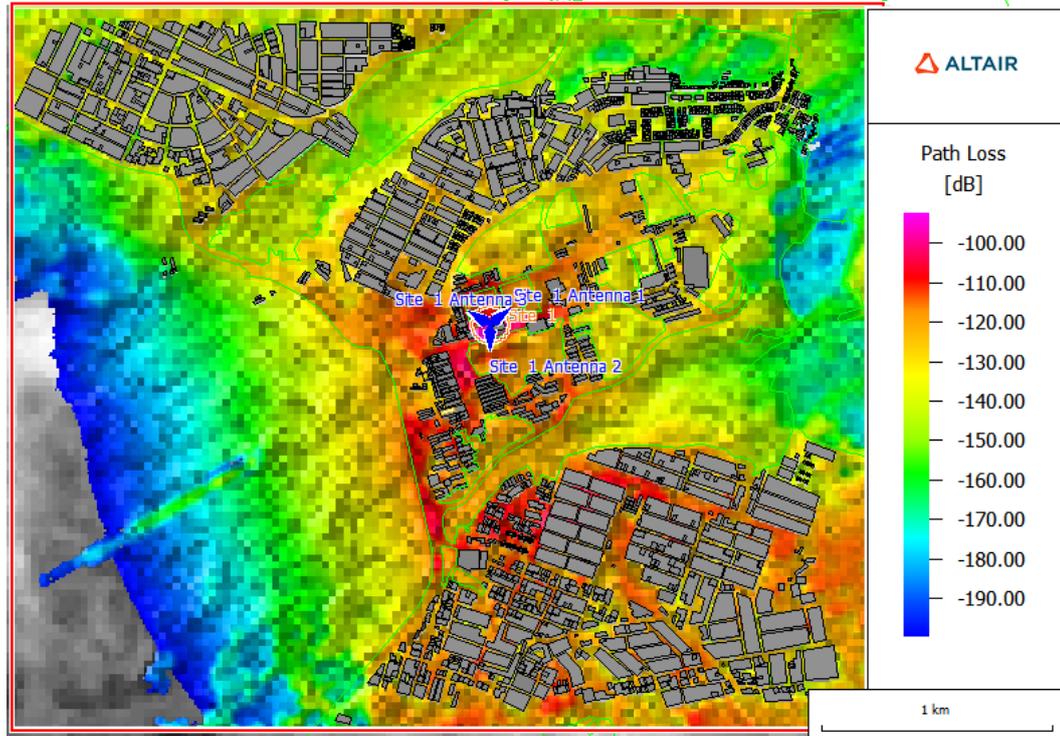
Os resultados são computados para as regiões onde não há edificações nem vegetação. Assim, é possível observar a atenuação causada ao sinal quando ele passa por trechos desse tipo. As Figuras 14, 15 e 16 mostram a perda de percurso para cada setor selecionado na antena transmissora. Os resultados apresentam coerência com os valores esperados, uma vez que o nível do sinal é maior nas proximidades da antena e tendem a reduzir consideravelmente com o aumento da distância e obstrução.

Figura 14 - Perda de Percurso para a antena do setor 1.



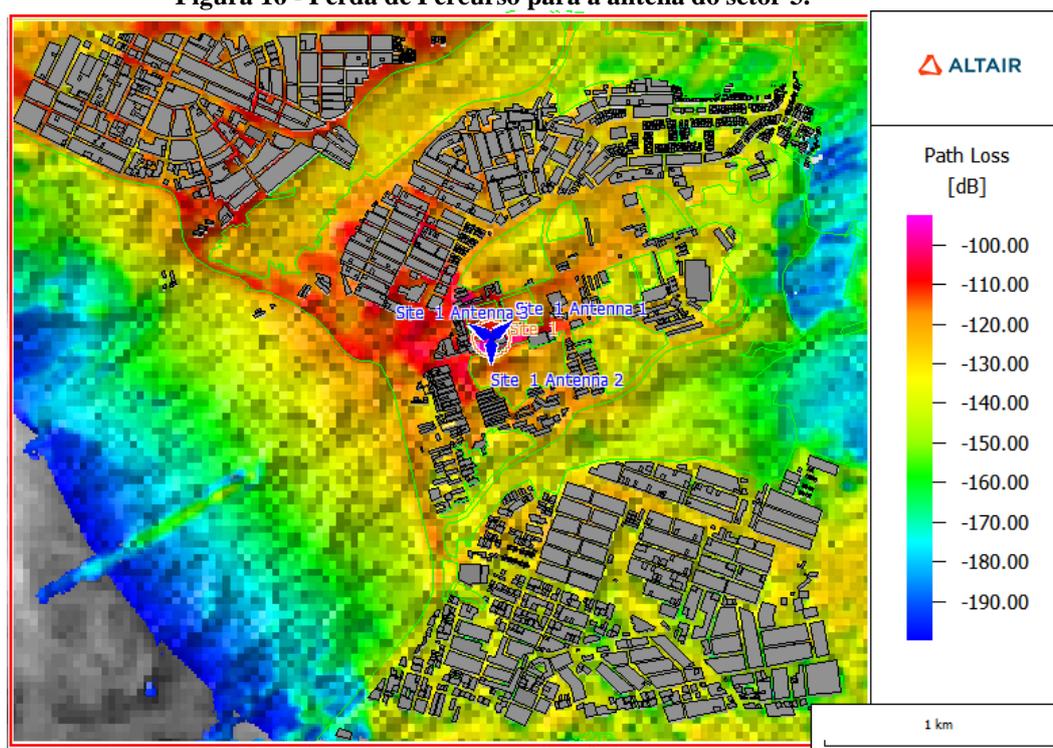
Fonte: de autoria própria.

Figura 15 - Perda de Percurso para a antena do setor 2.



Fonte: de autoria própria.

Figura 16 - Perda de Percurso para a antena do setor 3.



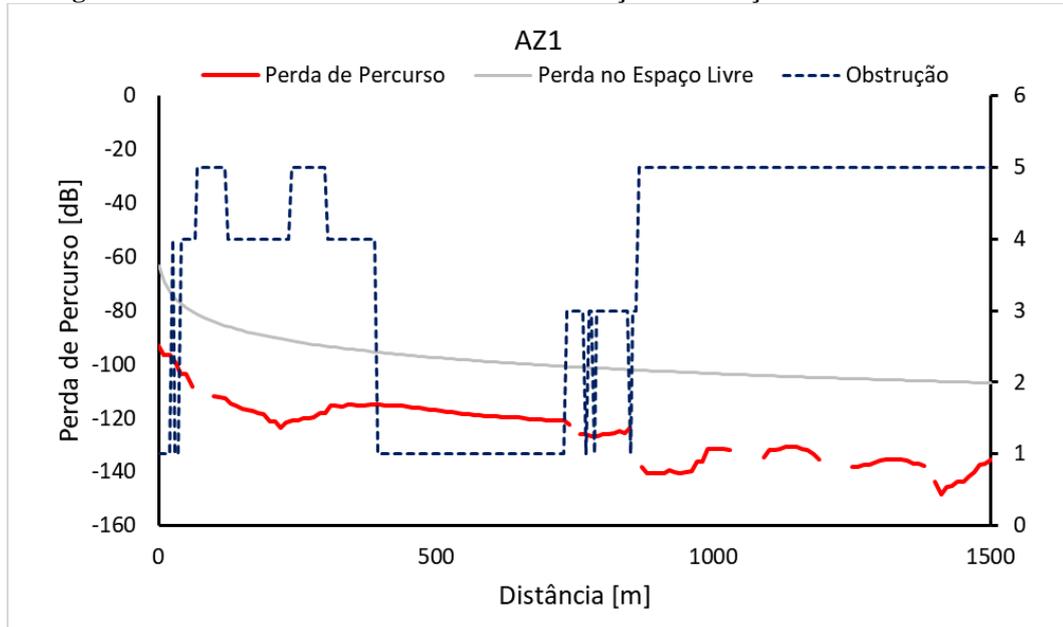
Fonte: de autoria própria.

Para uma melhor visualização, foi traçado o perfil da perda de percurso considerando uma linha reta radial de 1500 metros na direção de orientação de cada setor da antena. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 17, 18 e 19, correspondendo respectivamente aos azimutes 50° (setor 1), 180° (setor 2) e 300° (setor 3), conforme é indicado na Figura 6. Foi adicionado em cada gráfico ainda, a curva de perdas no espaço livre, calculada a partir da equação de Friis [22];[18], para servir de parâmetro de comparação de como seria o decaimento do sinal se não houvessem obstáculos, nem reflexões, difrações ou atenuações no caminho percorrido.

Na direção do azimute 1 (Figura 17) o sinal transmitido apresenta um decaimento mais rápido nas proximidades da antena, ocasionado pela vegetação mais densa nessa região, como pode ser verificado nas Figuras 6 e 12. A inclinação desse decaimento foi aproximada no MS Excel, apresentando um valor de $-0,12$ dB/m. Após esse trecho e até os 750 m, o decremento se dá de forma mais gradual, da ordem de $-0,0176$ dB/m. Na maior parte da região compreendida por esta radial, as antenas estão obstruídas pela vegetação (LOS-V), com obstrução de edificações adicionadas da vegetação (NLOS-V) ou com a situação de visada totalmente obstruída (NLOS). Apenas em uma pequena região há a linha de visada direta (LOS). É possível verificar ainda, que nos trechos cujas obstruções são mais altas (em torno de

5 m de altura), existem oscilações na perda de percurso, que decai em torno de um valor médio, cuja inclinação é $-0,0174$ dB/m.

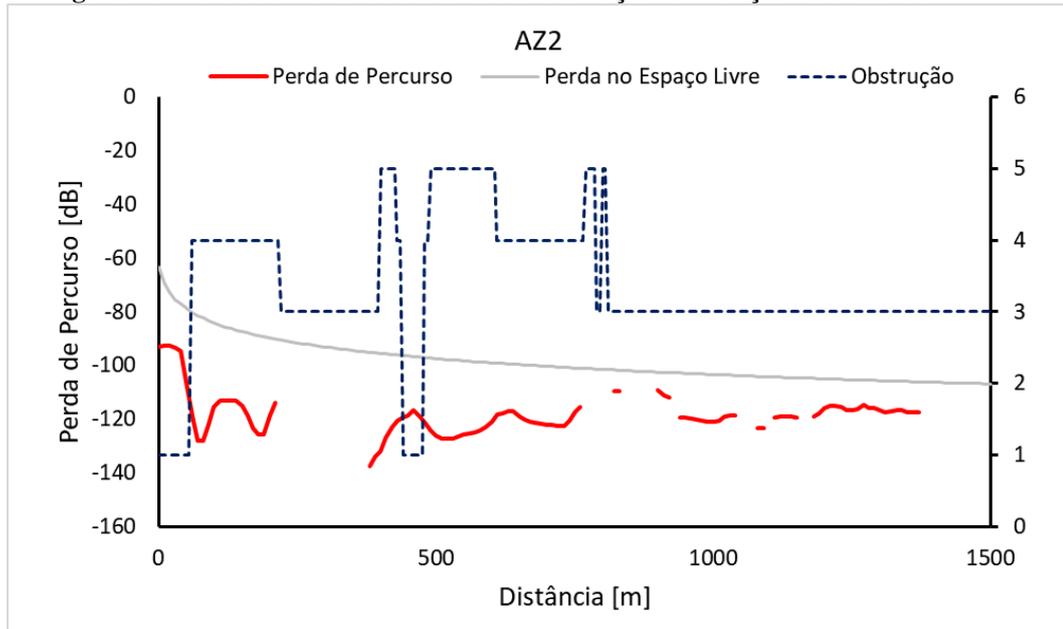
Figura 17 - Perda de Percurso e altura das obstruções em função da distância no AZ1.



Fonte: de autoria própria.

Na direção do azimute 2 (Figura 18) é observado um rápido decaimento nos 300 m iniciais, da ordem de $-0,1258$ dB/m, devido à trechos de vegetação densa e de alto ou médio porte (NLOS-V e LOS-V). Em seguida, entre os 460 e os 1000 m, o sinal se mantém quase constante, apresentando uma tendência de aumento com a distância, de $0,01$ dB/m. Entre 1000 m e 1500 m esse crescimento se dá de maneira mais gradual, da ordem de $0,0049$ dB/m. Para esta radial, em quase todo o trecho não há visada entre as antenas (NLOS), mas a obstrução é menor do que no azimute 1, e a maior parte do percurso conta com obstrução de 3 m.

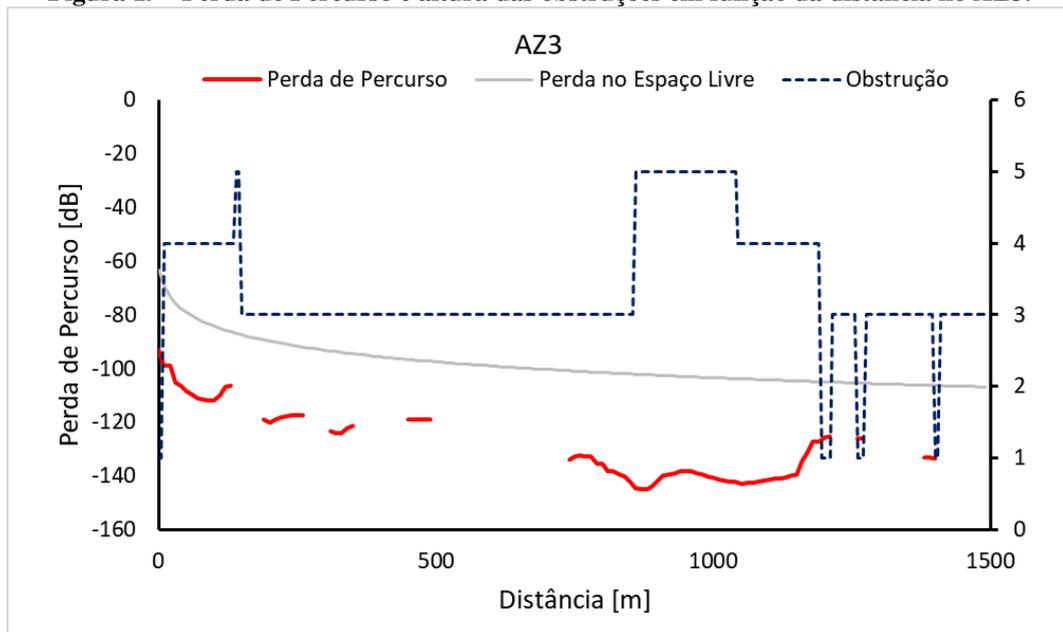
Figura 18 - Perda de Percurso e altura das obstruções em função da distância no AZ2.



Fonte: de autoria própria.

No terceiro azimute (300°) mostrado na Figura 19, as variações bruscas ocasionadas pela vegetação só são percebidas até os 135 m do transmissor, pois após essa distância, a região se torna predominantemente edificada, e a maior parte da região se encontra na situação de NLOS, tendo poucas ocorrências de LOS (linha de visada direta). Nos 500 m iniciais, a perda de percurso decai a uma taxa de $-0,04$ dB/m. Entre 500 m e 740 m não é possível a coleta de informações devido ao alto número de edificações, mas entre 740 m e 1000 m a tendência de queda se mantém, porém, menos acentuada do que a inicial ($-0,0263$ dB/m). Entre 1000 m e 1200 m há uma melhora na perda de percurso, cujo crescimento é em torno de $0,076$ dB/m.

Figura 19 - Perda de Percurso e altura das obstruções em função da distância no AZ3.



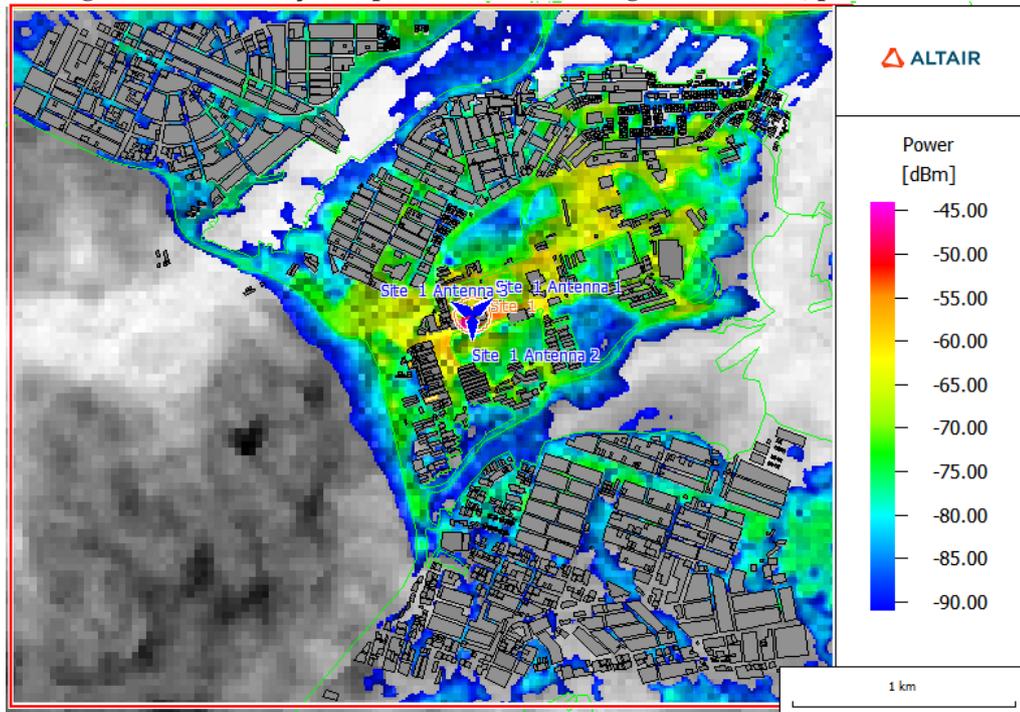
Fonte: de autoria própria.

4.3. POTÊNCIA

Para este trabalho, não foram encontrados os valores determinados por norma para a potência mínima de recepção das redes 5G. Por isso, foram considerados dois valores como limiares de recepção: -90 dBm, por ser um valor razoável que pode ser detectado pelo receptor, e -100 dBm, como apresentado em [42]. A partir desses valores, obteve-se a distribuição de potências na região analisada, e para uma melhor visualização, alterou-se a escala de cores da região e os valores apresentados nela para que fossem mostradas apenas as regiões onde o sinal chegaria com um nível igual ou superior aos limiares adotados. Os resultados são apresentados nas Figuras de 20 a 25.

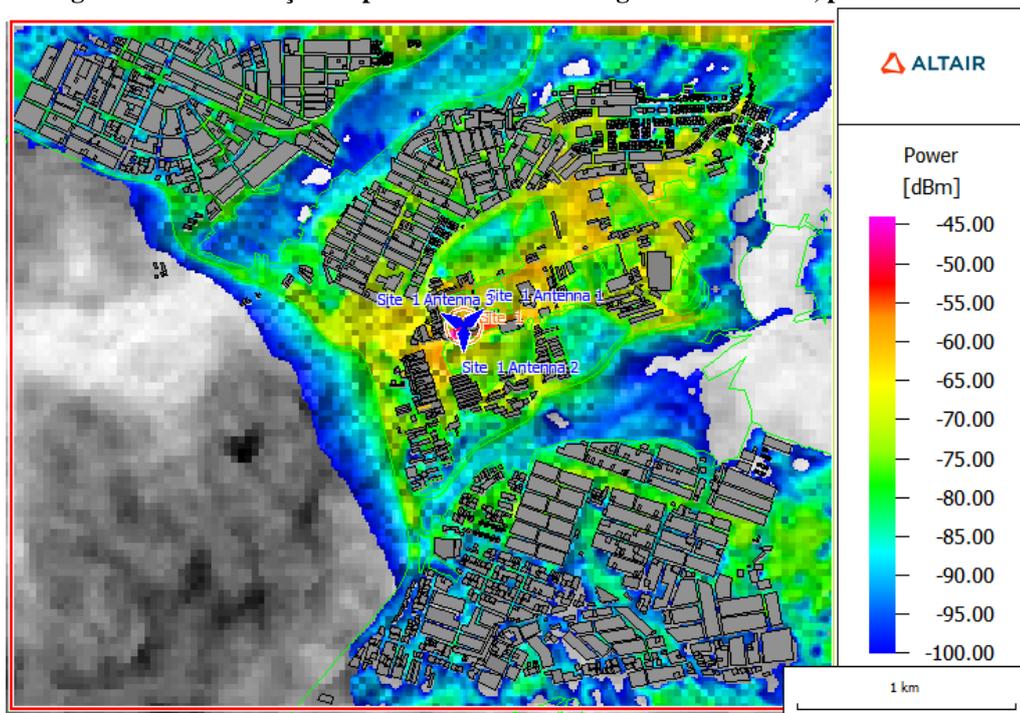
As Figuras 20 e 21 apresentam a distribuição de potências maiores ou iguais a -90 dBm e -100 dBm, respectivamente, considerando apenas o sinal emitido pela antena do setor 1. Os melhores níveis de potência são detectados na direção de frente a este setor (50°) e quando se considera -90 dBm são verificados mais pontos de sombra do que quando é utilizado -100 dBm. Assim, verifica-se que diminuindo o limiar da potência recebida, é alcançada uma maior cobertura, ainda que em alguns trechos o sinal chegue bastante atenuado. Os trechos de sombra encontrados ao longo da radial de 50° estão localizados em um declive do terreno, se encontrando nas margens do Rio Jaguaribe. Por isso, pode-se concluir que o sinal apresenta valores satisfatórios das regiões urbanizadas.

Figura 20 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -90dBm, para o setor 1.



Fonte: de autoria própria.

Figura 21 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -100 dBm, para o setor 1.

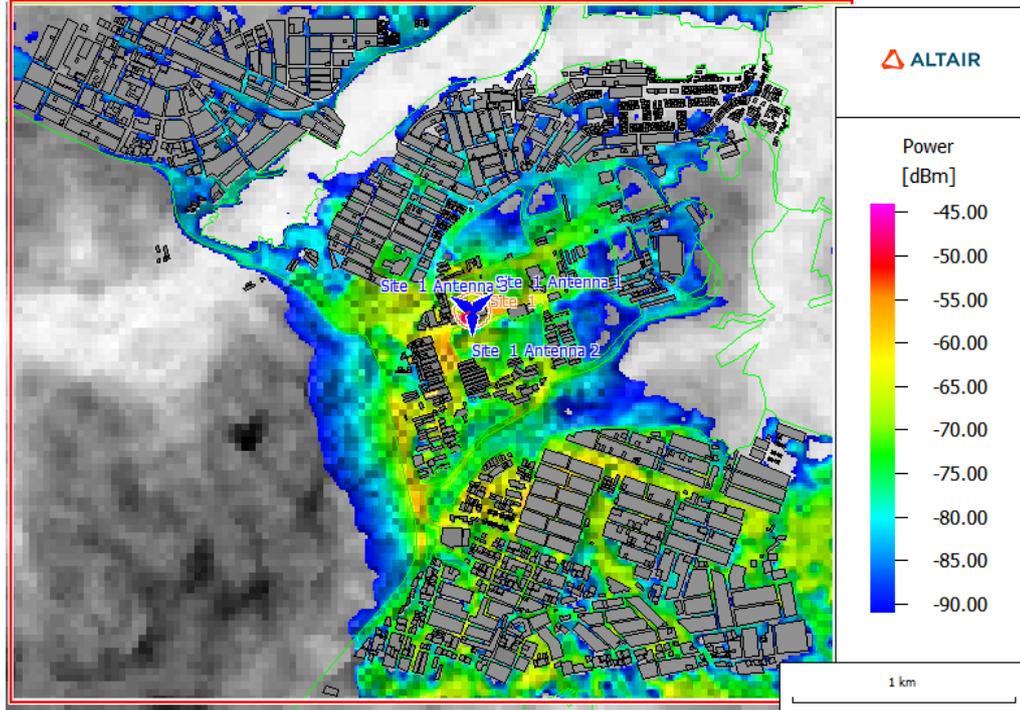


Fonte: de autoria própria.

As Figuras 22 e 23 mostram as distribuições de potências ao se considerar apenas o sinal transmitido pela antena do segundo setor, e resultados para a cobertura são muito semelhantes, sem regiões de sombra nos trechos edificados do mapa, apesar da predominante situação de

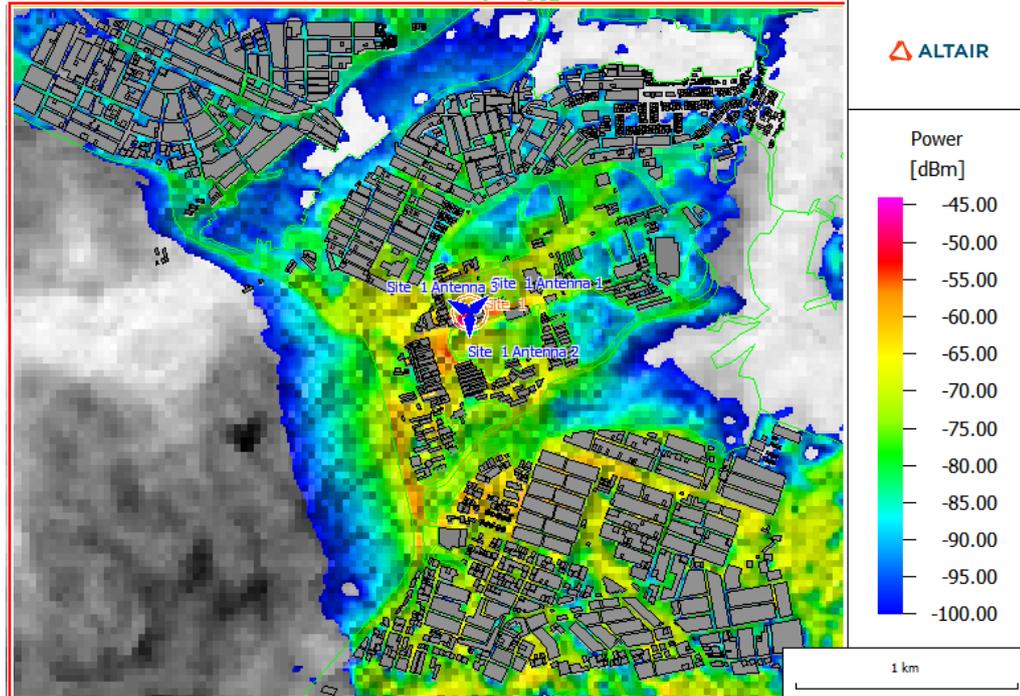
NLOS. Desse modo, pode-se concluir que os parâmetros utilizados na transmissão são capazes de garantir níveis de potência satisfatórios nas regiões urbanizadas da região inferior do mapa.

Figura 22 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -90dBm, para o setor 2.



Fonte: de autoria própria.

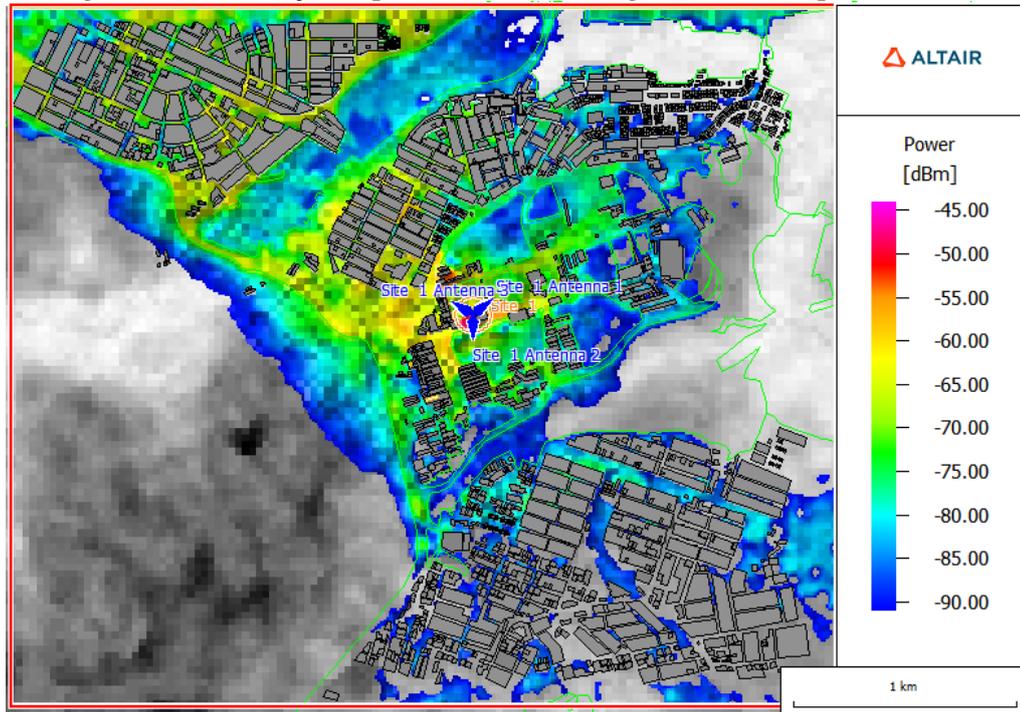
Figura 23 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -100 dBm, para o setor 2.



Fonte: de autoria própria.

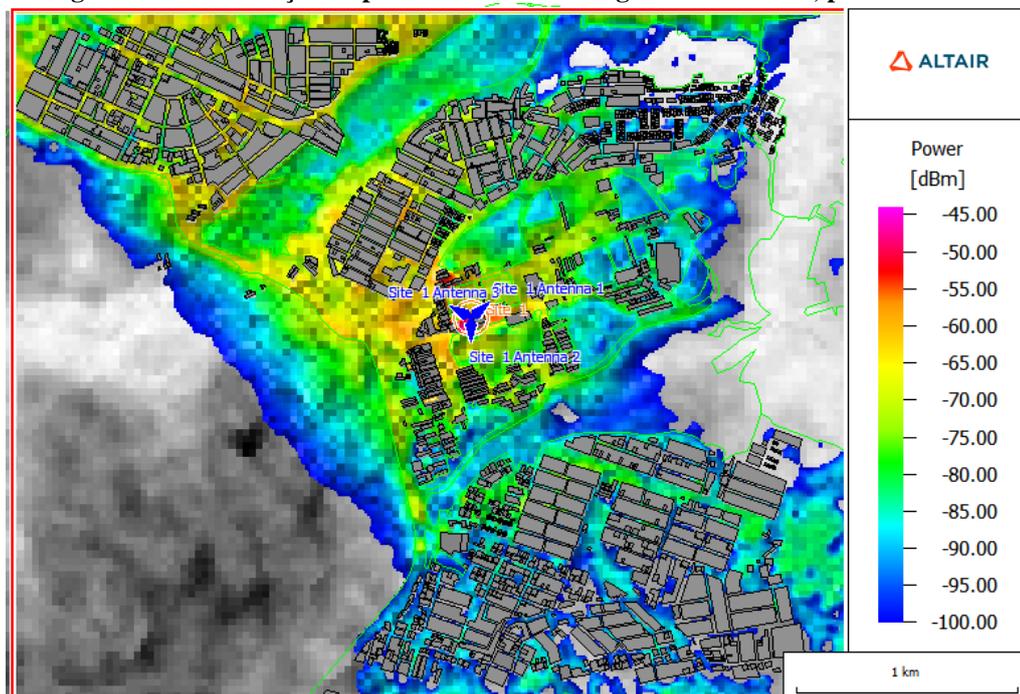
As Figuras 24 e 25 apresentam as distribuições de potência no terceiro azimute considerado, na direção de 300° . As duas figuras mostram que a cobertura é satisfatória para os dois níveis mínimos de potência escolhidos, apesar da situação predominante de NLOS, sem regiões de sombra na direção de maior interesse.

Figura 24 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -90dBm , para o setor 3.



Fonte: de autoria própria.

Figura 25 - Distribuição de potências maiores ou iguais a -100 dBm , para o setor 3.



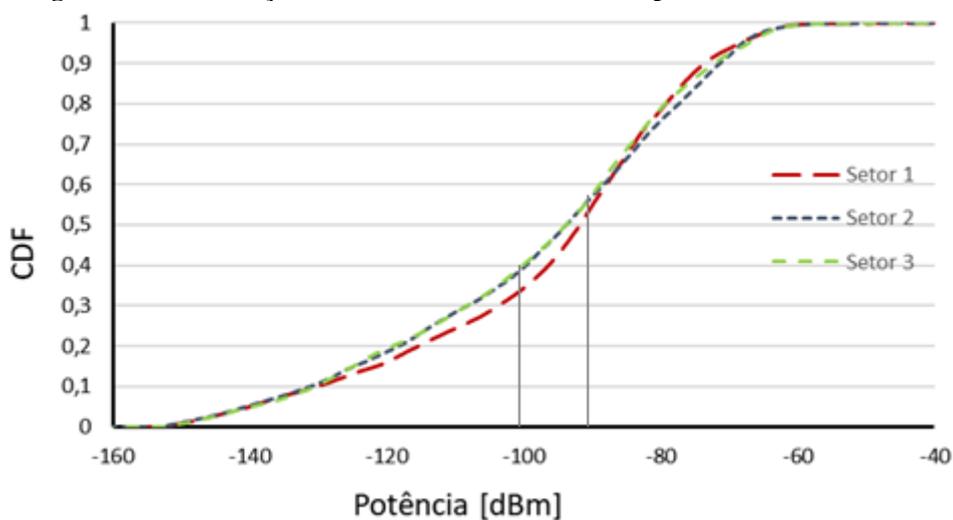
Fonte: de autoria própria.

Conforme altera-se o setor de análise, as regiões passam a receber diferentes níveis de potência, e as respectivas regiões atendidas por cada setor apresentam melhores resultados. Ao observar as três imagens, é possível verificar ainda que a região como um todo conta com uma cobertura satisfatória, com poucas regiões de sombra, apesar das situações de visada obstruídas, tanto para o sinal de -90 dBm, quanto para o sinal de -100 dBm, presentes em regiões de declive e/ou vegetadas.

Ainda considerando um setor da antena por vez, foi determinada a Distribuição Cumulativa de Probabilidade da potência de recepção, e os resultados são mostrados na Figura 26, onde é possível verificar que entre -100 dBm e -90 dBm, o setor 1 apresentou menor probabilidade de estar abaixo dos limiares utilizados. As antenas dos setores 2 e 3 apresentaram resultados muito próximos. Desse modo, para um mesmo valor de probabilidade, o setor 1 apresentou maiores níveis de potência do que nos outros dois setores. A probabilidade de o sinal chegar ao receptor com potência menor do que -90 dBm é de mais de 50%. Aumentando-se a tolerância, as chances do sinal recebido ser menor do que -100 dBm é de 34,4% no setor 1, e de aproximadamente 40% nos outros dois setores.

Conclui-se assim, que utilizar -100 dBm como a potência mínima aceitável na recepção, aumenta a cobertura, diminuindo as regiões de sombra. No azimute de 50° graus os níveis de potência foram maiores, provavelmente porque era a direção com menores trechos em NLOS, apesar da linha de visada ser bastante afetada pela presença da vegetação.

Figura 26 - Distribuição Cumulativa de Probabilidade para cada setor da antena.



4.3. PERFIL DE ATRASO DE POTÊNCIA DO CANAL

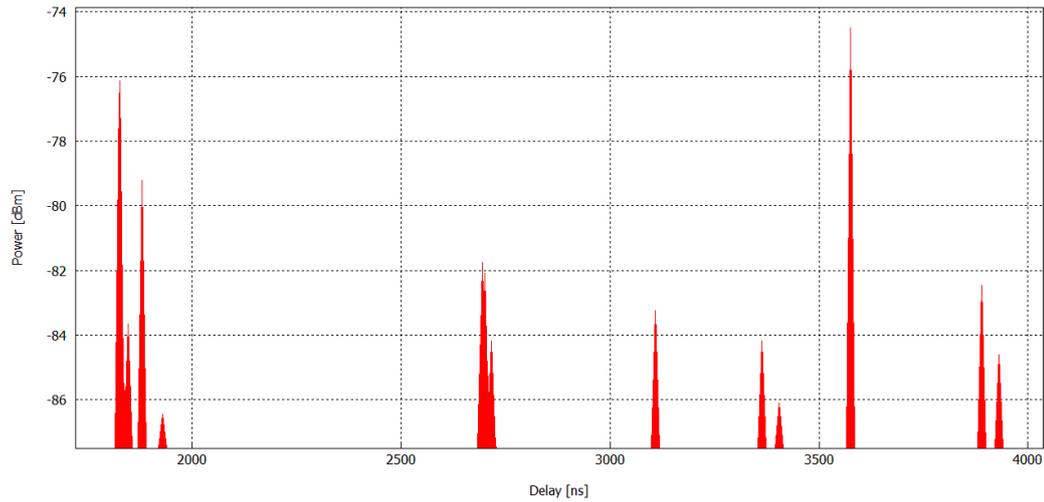
O Modelo do Traçado de Raios possibilita também a obtenção da Resposta ao Impulso do Canal (CIR – *Channel Impulse Response*), um importante parâmetro para conhecer o perfil de atraso de potências. A resposta ao impulso fornece as principais componentes de caminhos múltiplos que chegam ao receptor, com características de amplitude e atraso na recepção.

A CIR foi coletada nas radiais de 50°, 180° e 300°, na frequência de 3500 MHz. Foram escolhidos pontos a 500 m, 1000 m e 1500 m do transmissor, e após a coleta dos dados, foram calculados os parâmetros de dispersão de tempo, como a média do atraso em excesso ($\bar{\tau}$) e o espalhamento do atraso *rms* (σ_{τ}). As subseções a seguir apresentam a resposta ao impulso e os parâmetros calculados para cada setor.

4.3.1. Setor 1 (50°)

As Figuras 27, 28 e 29 apresentam as componentes de caminhos múltiplos obtidas através da resposta ao impulso do canal na direção da radial de 50°, em pontos localizados a 500 m, 1000 m e 1500 m do transmissor, respectivamente. O primeiro ponto considerado (Figura 27), situado à 500 m da antena, está em situação de visada desobstruída. Neste caso, a componente direta entre as duas antenas e que percorre o menor caminho tende a ser de maior amplitude. No entanto, percebe-se que a componente de maior amplitude chega ao receptor com um atraso de 1750,9 ns, com relação à primeira componente. Também foi verificado um número considerável de outras componentes (de caminhos diferentes) chegando ao receptor, grande parte delas com atenuação máxima de 10 dB em relação a componente de maior energia. Para este caso, a recepção vai estar sujeita a forte influência de desvanecimento devido ao espalhamento do sinal no tempo ocasionado pelos efeitos do canal.

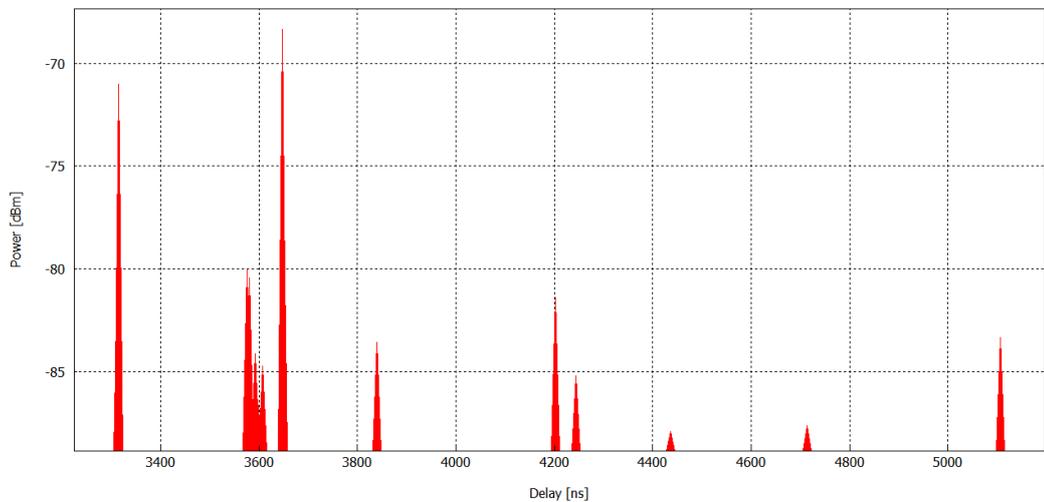
Figura 27 - CIR na radial de 50°, a 500 m do transmissor.



Fonte: de autoria própria.

O segundo ponto considerado se encontra a 1000 m do transmissor, com a visada obstruída por vegetação (NLOS-V). Desse modo, não há raio direto entre as duas antenas, e assim, a primeira componente que chega ao receptor não é a que contém mais energia. A Figura 28 mostra que chegam várias componentes no receptor, e a mais energética chega com atraso de 333,8 ns com relação à primeira componente. As demais sofrem com atenuações acima dos 10 dB com relação à de maior energia, mas chegam com amplitudes acima dos limiares adotados para este trabalho (-90 dBm e -100 dBm) e, portanto, poderão ser detectadas pelo receptor.

Figura 28 - CIR na radial de 50°, a 1000 m do transmissor.

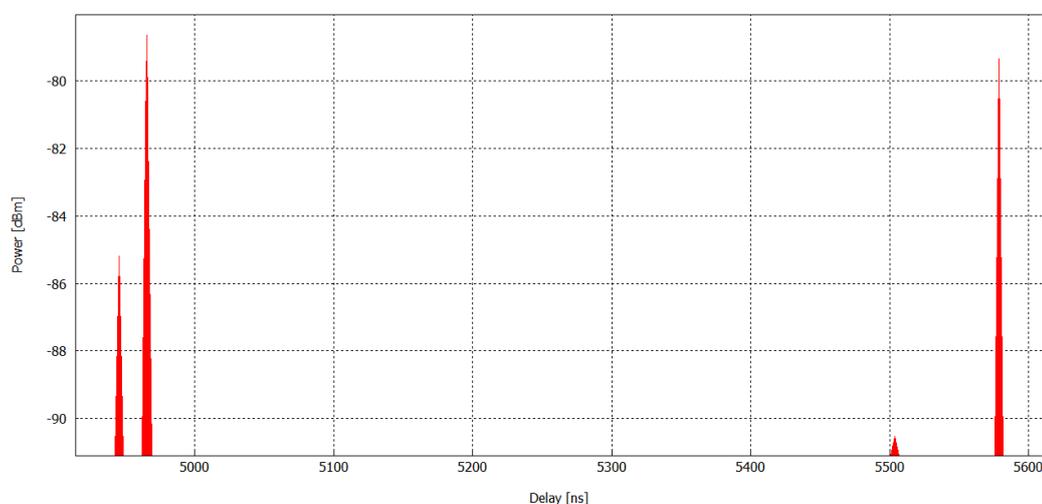


Fonte: de autoria própria.

O ponto a 1500 m do receptor (Figura 29) se encontra em situação de obstrução da linha de visada por influência da vegetação (NLOS-V). Com isso, a componente que chega com menor atraso no receptor não será a de maior amplitude. Dessa vez, é detectado um menor

número de componentes de multipercurso no receptor do que nos dois pontos anteriores e uma delas chega com potência abaixo dos -90 dBm, sendo cortada no perfil de atraso de potências que considera esse valor como limiar de recepção, e sendo considerada no segundo perfil, que considera componentes acima dos -100 dBm.

Figura 29 - CIR na radial de 50°, a 1500 m do transmissor.



Fonte: de autoria própria.

As Tabelas 6 e 7 apresentam a média de atraso em excesso, espalhamento do atraso *rms*, a banda de coerência e o máximo atraso em excesso do canal em estudo, considerando os limiares de potência na recepção de -90 dBm e de -100 dBm, respectivamente. [1] mostra que os valores típicos de espalhamento do atraso *rms* são da ordem de microssegundos nos canais de rádio móvel em ambientes exteriores, e cita como exemplo um canal urbano na frequência de 910 MHz, cujo espalhamento do atraso *rms* é em média 1,3 μ s, na cidade de Nova Iorque. A partir dos valores do espalhamento do atraso *rms* é possível calcular a banda de coerência do canal, que mostra a largura de banda para a qual o canal apresenta um comportamento quase uniforme. A resposta ao impulso também permite observar o máximo atraso em excesso do canal nos pontos de estudo, que é dado pelo atraso com que a última componente chega ao receptor, em relação à primeira.

Os valores são muito próximos entre as duas tabelas, porque apenas uma componente foi excluída para os cálculos feitos na Tabela 6. Desse modo, para essa direção, o sinal não sofrerá grandes espalhamentos se considerada a potência de recepção de até -100 dBm. Com a informação do máximo atraso em excesso do canal, pode ser determinado o tamanho do prefixo cíclico a ser utilizado nos símbolos OFDM transmitidos para se corrigir os efeitos que os multipercursos causam na recepção do sinal, como a ISI e ICI.

Tabela 6 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 50°) com o limiar de recepção de -90 dBm.

Distância (m)	Média de Atraso em Excesso (μ s)	Espalhamento do Atraso rms (μ s)	Banda de Coerência (KHz)	Máximo Atraso em Excesso (μ s)
500	0,717	0,778	25,693	2,105
1000	0,204	0,266	75,186	1,793
1500	0,171	0,266	75,237	0,633

Fonte: de autoria própria.

Tabela 7 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 50°) com o limiar de recepção de -100 dBm.

Distância (m)	Média de Atraso em Excesso (μ s)	Espalhamento do Atraso rms (μ s)	Banda de Coerência (KHz)	Máximo Atraso em Excesso (μ s)
500	0,717	0,778	25,693	2,105
1000	0,204	0,266	75,186	1,793
1500	0,178	0,268	74,491	0,633

Fonte: de autoria própria.

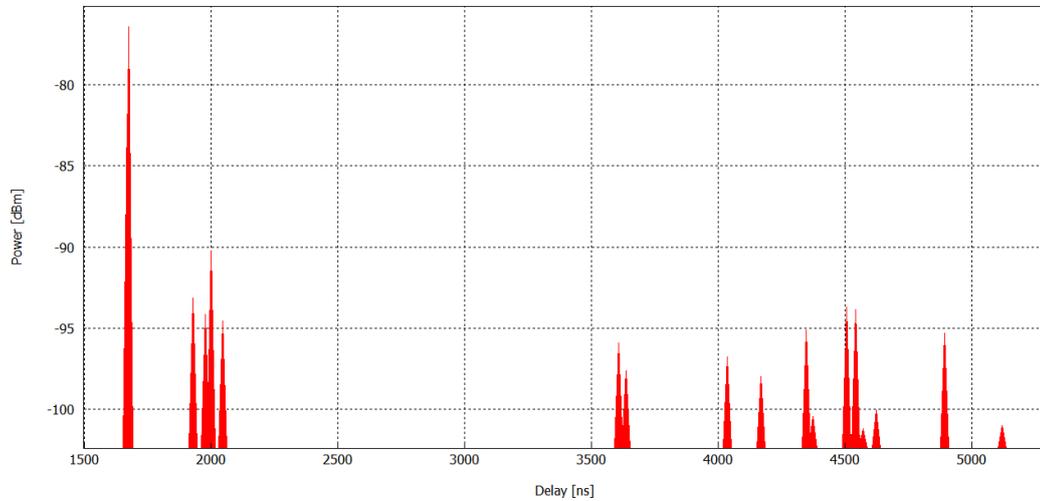
A partir da análise em conjunto da situação de visada, perda de percurso e a resposta ao impulso do canal pode-se verificar que na direção de 50° o sinal sofre grande influência da vegetação que está presente nas proximidades da antena. Assim, nos 500 m iniciais, o sinal sofre com maiores atrasos e atenuações. Isso se reflete na banda de coerência calculada nesse ponto, que foi de 25,693 KHz. Depois desse trecho, a obstrução se mantém mais constante, voltando a crescer próxima dos 1000 m, fazendo com que o sinal sofra menos com atrasos e espalhamentos, resultando em uma banda de coerência maior do que aquela detectada no primeiro ponto calculado. Como essa é uma direção onde predomina as situações de LOS e LOS-V, o sinal é menos espalhado e menos atenuado do que nas demais direções. De acordo com a Tabela 2 verifica-se que nessa radial, um espaçamento entre subportadoras de 15 KHz ou de 30 KHz é suficiente para resolver os efeitos causados pelos multipercursos.

4.3.2. Setor 2 (180°)

No primeiro ponto de análise na direção de 180° (Figura 30), o receptor se encontra em situação de visada direta com a antena transmissora (LOS), e como é esperado para essa situação, a componente direta, que percorre o menor caminho entre as antenas é a que apresenta maior amplitude. Apenas duas componentes, muito próximas, possuem amplitudes acima dos -90 dBm, e o atraso entre elas é de 3,34 μ s. Por isso, apenas essas duas componentes são consideradas para o máximo atraso em excesso nesse ponto, quando consideradas apenas as componentes acima de -90 dBm. Quando é utilizada a potência mínima de recepção de -100 dBm, poucas componentes serão descartadas, causando alteração nos cálculos dos parâmetros

de dispersão de tempo do canal. Essa atenuação de mais de 10 dB entre as primeiras componentes e as demais acontece provavelmente, pela presença de uma região de mata densa nas proximidades do transmissor.

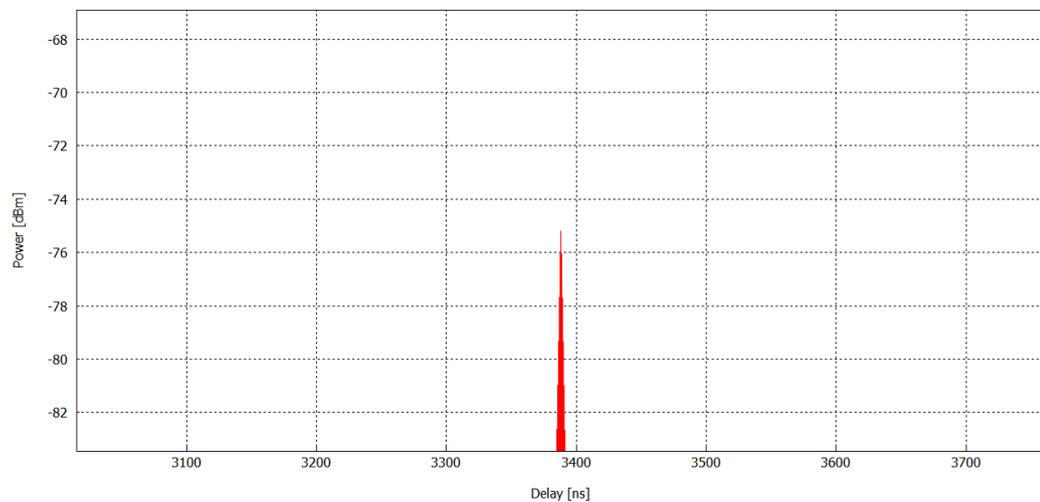
Figura 30 - CIR na radial de 180°, a 500 m do transmissor.



Fonte: de autoria própria.

O segundo ponto, a 1000 m do transmissor, se encontra com a linha de visada totalmente obstruída, e chega apenas uma componente no receptor, oriunda de um caminho indireto. Assim, não é possível calcular o máximo atraso em excesso nem os demais parâmetros de dispersão de tempo (Figura 31). Nesse ponto também há uma grande influência da vegetação, pois além da mata presente nas proximidades do transmissor, existe outro trecho de mata entre 500 m e 750 m do transmissor.

Figura 31 - CIR na radial de 180°, a 1000 m do transmissor.

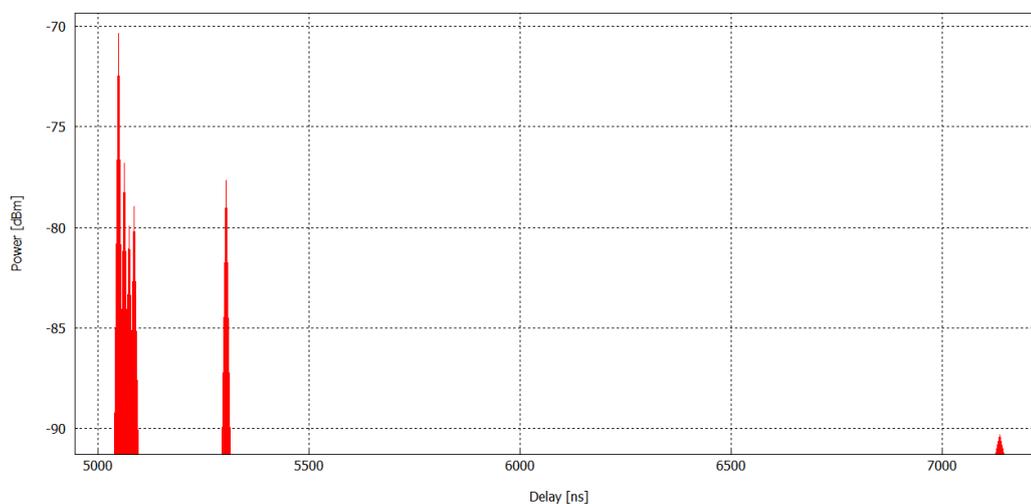


Fonte: de autoria própria.

O ponto situado a 1500 m do transmissor também se encontra com a linha de visada direta totalmente obstruída, e as componentes que chegam são provenientes de raios indiretos

(Figura 32). A componente que percorre o menor caminho chega também com maior amplitude. As demais componentes chegam com potência acima dos -100 dBm e todas participam dos cálculos para a obtenção do perfil de atraso de potências nesse limiar, e a última componente será excluída no cálculo cujo limiar considerado é de -90 dBm.

Figura 32 - CIR na radial de 180°, a 1500 m do transmissor.



Fonte: de autoria própria.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os parâmetros de dispersão de tempo do canal na direção de 180°, considerando -90 dBm e -100 dBm como potências mínimas de recepção, respectivamente. A 1000 m do transmissor, só foi registrada uma componente de multipercurso e por esse motivo, não puderam ser calculadas a média de atraso em excesso, o espalhamento do atraso *rms*, a banda de coerência e o máximo atraso em excesso. À 500 m do transmissor, a Tabela 8 mostra um espalhamento do atraso *rms* bem mais baixo do que aquele apresentado na Tabela 9, o que se deve à exclusão das componentes abaixo dos -90 dBm. Desse modo, a Banda de Coerência alcançada na situação da Tabela 8 é bastante alta, pois apenas componentes muito próximas foram levadas em consideração, o que corrobora com o que é descrito por [1], mostrando que o espalhamento do atraso *rms* e a banda de coerência do canal são inversamente proporcionais. Isso se deu provavelmente devido à influência da mata mais densa nessa direção, próxima do transmissor. O máximo atraso em excesso no ponto a 500 m do transmissor, para a potência mínima de -100 dBm, foi acima do suportado pelo SCS de 30 KHz, sendo recomendado a utilização de 15 KHz de espaçamento entre as subportadoras ou o uso do prefixo cíclico estendido, utilizado com o SCS de 60 KHz, caso gere um bom rendimento e custo-benefício para o sistema. Para a potência mínima de -90 dBm, todos os CPs fornecidos pelas SCSs apresentadas na Tabela 2 seriam capazes de resolver o espalhamento do sinal nessa direção.

Tabela 8 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 180°) com o limiar de recepção de -90 dBm.

Distância (m)	Média de Atraso em Excesso (μ s)	Espalhamento do Atraso rms (μ s)	Banda de Coerência (KHz)	Máximo Atraso em Excesso (μ s)
500	0,005	0,003	7306,400	0,00656
1000	-	-	-	-
1500	0,022	0,065	309,305	0,254

Fonte: de autoria própria.

Tabela 9 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 180°) com o limiar de recepção de -100 dBm.

Distância (m)	Média de Atraso em Excesso (μ s)	Espalhamento do Atraso rms (μ s)	Banda de Coerência (KHz)	Máximo Atraso em Excesso (μ s)
500	0,247	0,745	26,843	3,224
1000	-	-	-	-
1500	0,030	0,142	140,481	2,085

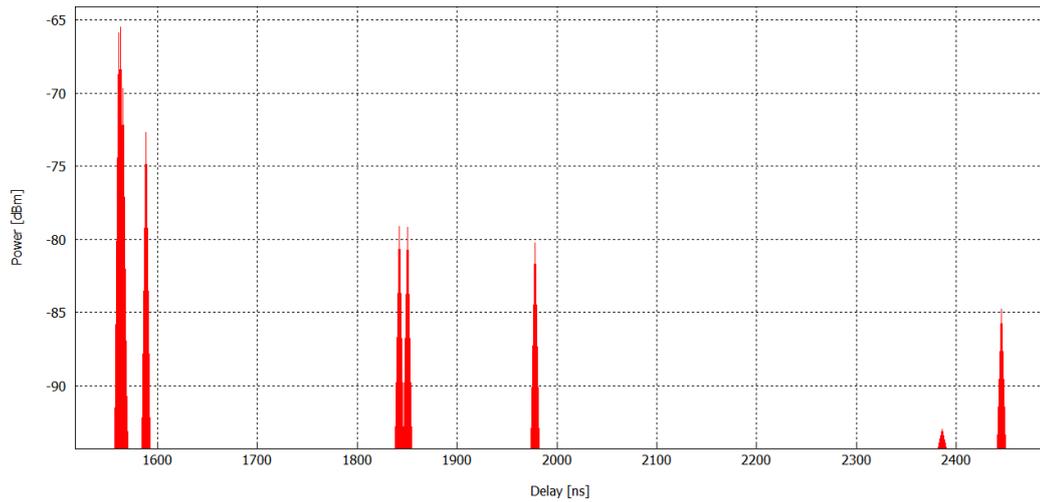
Fonte: de autoria própria.

Na segunda radial de análise, a vegetação se faz mais presente nos 500 m iniciais do que nas outras direções e as situações de visada predominantes são as de NLOS-V e NLOS. Assim, em 500 m a principal componente chega mais atenuada do que a componente detectada em 1000 m. A componente detectada em 1000 m sofre mais atenuação do que aquelas recebidas em 1500 m, pois apesar de estar mais próximo do transmissor, o ponto a 1000 m também está mais próximo de um trecho de mata densa, e já o ponto a 1500 m não possui trechos de vegetação próximos. É possível observar assim, que a vegetação densa nas proximidades do transmissor e do receptor tem grande influência sobre a potência do sinal recebido.

4.3.3. Setor 3 (300°)

A Figura 33 mostra as componentes de multipercurso recebidas no primeiro ponto de análise (a 500 m do transmissor), cuja linha de visada se encontra obstruída. Apesar da condição de NLOS, a componente que percorre o caminho mais rápido é também a de maior potência. Algumas componentes chegam com níveis até 15 dB abaixo das mais energéticas, mas com potências acima dos -90 dBm, e assim, são levadas em consideração nos cálculos dos parâmetros de dispersão de tempo do canal, excluindo-se apenas uma componente para os cálculos da Tabela 10.

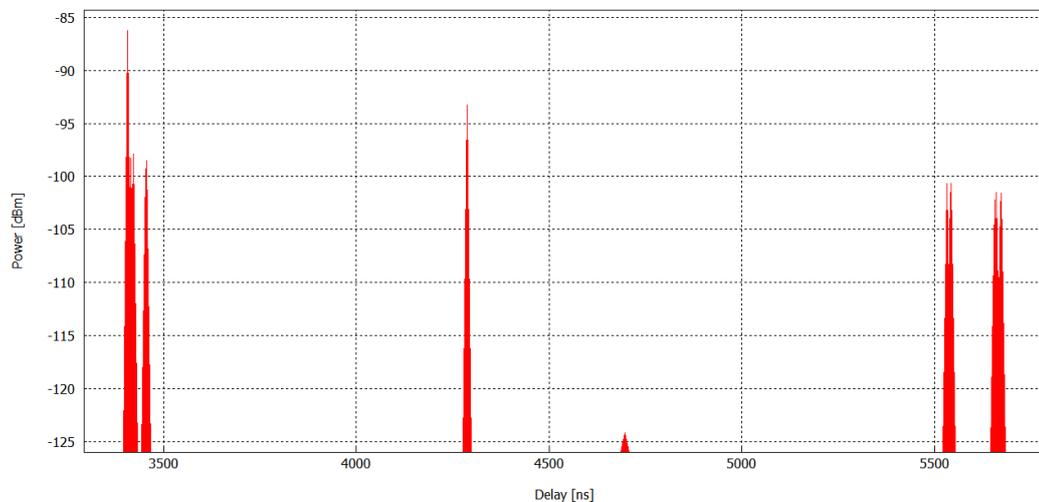
Figura 33 - CIR na radial de 300°, a 500 m do transmissor.



Fonte: de autoria própria.

O ponto a 1000 m do transmissor se encontra com a linha de visada obstruída por vegetação (NLOS-V), após um trecho de linha de visada totalmente obstruída (NLOS). Assim, as componentes que chegam no receptor apresentam os menores níveis de potência dentre os valores obtidos neste trabalho (Figura 34). Considerando-se -90 dBm como o limiar de potência de recepção, apenas a primeira componente seria considerada, mas, considerando-se -100 dBm, ainda seria possível considerar outras componentes. As demais seriam tratadas como ruído, fazendo com que o sinal não estivesse muito sujeito aos efeitos de espalhamento do sinal no domínio do tempo.

Figura 34 - CIR na radial de 300°, a 1000 m do transmissor.

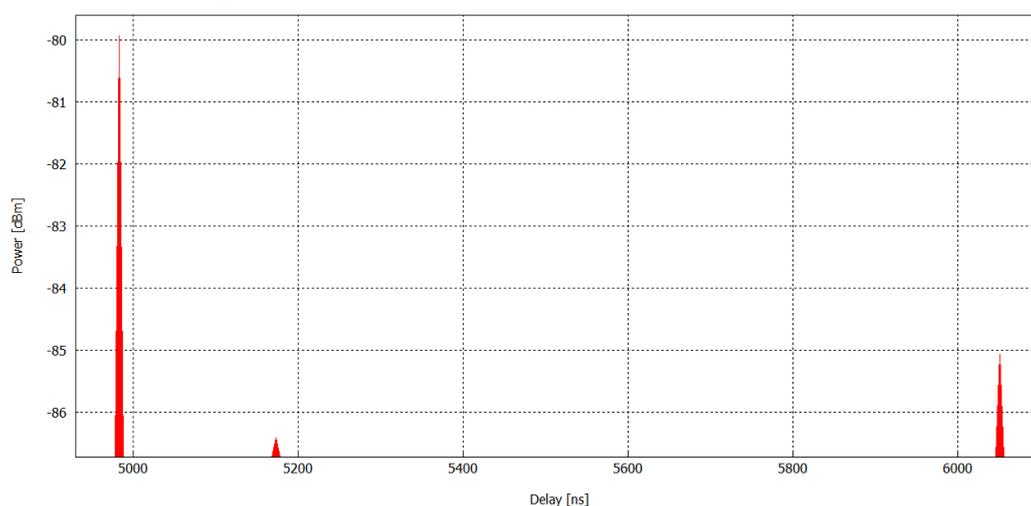


Fonte: de autoria própria.

No ponto a 1500 m do transmissor, o receptor tem a visada obstruída, mas se encontra em um local mais alto do que o segundo ponto (com 1000 m de distância do transmissor). Desse modo, o sinal percorre um caminho mais longo para chegar até o receptor, mas chega com

melhores níveis de potência, tendo a primeira componente como a mais energética, como é mostrado na Figura 35. As outras componentes chegam com atenuações inferiores a 10 dB e também causarão desvanecimentos no receptor, sendo consideradas para o cálculo dos parâmetros de dispersão de tempo do canal. Nesse caso, todas as componentes são utilizadas nos cálculos para ambas as potências mínimas consideradas, e os valores obtidos são os mesmos, como pode ser visto nas Tabelas 10 e 11.

Figura 35 - CIR na radial de 300°, a 1500 m do transmissor.



Fonte: de autoria própria.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os parâmetros de dispersão de tempo do canal na direção do setor de 300°. O espalhamento do atraso *rms* foi bem baixo em 500 m, e assim, conta-se com uma alta banda de coerência nesse trecho, próxima dos 220 KHz. Apesar de várias componentes serem utilizadas entre elas, a diferença entre as mais energéticas e as demais, foi igual ou superior a 15 dB, de modo que elas não interferiram severamente nos resultados calculados. A atenuação das demais componentes pode ser justificada pelo baixo nível das obstruções nesse trecho, onde a maior parte está em torno de 3 m de altura.

Em 1000 m, só uma componente é considerada quando o limiar de potência é de -90 dBm (Tabela 10) e assim, os parâmetros de dispersão de tempo não podem ser calculados. Para o limiar de -100 dBm, outras componentes são consideradas e os parâmetros podem ser calculados, e nesse ponto é encontrada uma banda de coerência bem menor do que a do ponto anterior. Em 1500 m o espalhamento do atraso *rms* tende a aumentar e a BC a cair. As baixas potências encontradas nesses dois pontos podem ser explicadas como uma consequência do aumento da distância e do nível das construções, bem como da densidade destas. A maior parte da região coberta por este setor da antena não está em linha de visada (NLOS). O máximo atraso em excesso para as duas situações estudadas permite a utilização do espaçamento entre

subportadoras de 15 KHz ou de 30 KHz, dependendo da banda disponível para o canal, pois o CP padrão utilizado nessas duas situações é capaz de resolver o espalhamento do sinal no tempo para este canal, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 10 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 300°) com o limiar de recepção de -90 dBm.

Distância (m)	Média de Atraso em Excesso (μ s)	Espalhamento do Atraso rms (μ s)	Banda de Coerência (KHz)	Máximo Atraso em Excesso (μ s)
500	0,021	0,089	224,991	0,883
1000	-	-	-	-
1500	0,242	0,418	47,800	1,067

Fonte: de autoria própria.

Tabela 11 - Parâmetros de dispersão de tempo do canal (azimute de 300°) com o limiar de recepção de -100 dBm.

Distância (m)	Média de Atraso em Excesso (μ s)	Espalhamento do Atraso rms (μ s)	Banda de Coerência (KHz)	Máximo Atraso em Excesso (μ s)
500	0,022	0,091	219,131	0,883
1000	0,076	0,242	82,514	0,88
1500	0,242	0,418	47,800	1,067

Fonte: de autoria própria.

Na radial de 300°, a primeira simulação (em 500 m) é a que conta com menor atraso e melhor nível de potência, dentre as direções analisadas, porque é a direção que conta com menor interferência da vegetação nas proximidades do transmissor. Próximo aos 1000 m, a obstrução da região tende a crescer e junto da situação de visada predominante de NLOS, o sinal detectado nesse ponto sofre maiores atenuação e atrasos. Em 1200 m a altura da obstrução passa a cair novamente e o sinal chega com níveis semelhantes ao sinal na direção de 50°, e com um atraso menor do que o sinal de 1500 m no azimute 2.

5. CONCLUSÕES

Para suprir a demanda crescente por maiores taxas de transferência e a necessidade de conectar cada vez mais dispositivos à internet, entre outros motivos, foi criada a 5ª Geração de Telefonia Móvel celular, que no ano de 2021 já começa a chegar a algumas cidades brasileiras. Para se projetar uma rede de telefonia móvel de qualidade, é necessária a realização de simulações e medições de predição de canal, para entender os fatores que afetarão o sinal nessa região, e buscar minimizá-los.

Este trabalho apresentou a aplicação do Modelo do Traçado de Raios Inteligente na caracterização da perda de percurso e o perfil de atraso de potências numa região densamente vegetada, localizada na cidade de João Pessoa – PB, na frequência de 3500 MHz, uma das frequências alocadas inicialmente para implantação da rede LTE-5G no Brasil. Os dados foram coletados considerando os azimutes de 50°, 180° e 300°, direções comuns na transmissão LTE. A região de interesse é caracterizada por possuir um ambiente heterogêneo de propagação, com regiões de elevadas edificações, regiões suburbanas e a presença de florestas.

Foi analisada também a situação de desobstrução das antenas (visada), considerando inclusive a obstrução por vegetação. Pôde-se observar uma forte influência das construções e da vegetação na perda de percurso, e os resultados apresentaram uma forte dependência com a situação de desobstrução. As simulações realizadas com o Modelo de Traçado de Raios Inteligente possibilitam também a obtenção da Resposta ao Impulso do canal, um importante parâmetro para traçar o perfil de atraso de potências na região. A partir desse perfil, pode-se estipular o espaçamento entre as subportadoras e a duração do prefixo cíclico, de modo a resolver na transmissão os principais desvanecimentos causados pelo canal.

A partir das simulações é possível verificar a forte influência da vegetação no canal de rádio móvel dessa região. Nos pontos de medições mais próximos de regiões de vegetação mais densa, ocorreram atenuações mais fortes e maiores atrasos na chegada das primeiras componentes. Outras situações de atrasos altos foram verificadas em pontos cuja visada direta estava obstruída (NLOS), pois assim, o sinal que chega ao receptor precisa percorrer distâncias maiores. Os parâmetros de dispersão de tempo ficaram dentro do considerado normal em [1] para canais de rádio móvel em situações *outdoor*.

Os resultados obtidos estimulam o prosseguimento dos estudos, com a realização de campanhas de medições para comprovar a eficácia do modelo empregado nas simulações, e a emulação de um canal com as características obtidas para verificar o comportamento de sinais com modulações digitais, através da constelação, relação sinal-ruído, entre outras. Essas

medições não puderam ser realizadas para compor este trabalho devido à pandemia do COVID-19.

REFERÊNCIAS

- [1] RAPPAPORT, T. S., **Comunicações Sem Fio - Princípios e Práticas**, 2 ed. São Paulo: Pearson, 2008.
- [2] CARVALHO, G. S. D. de. **Análise de Capacidade em Canais de Ondas Milimétricas Modelados a Partir da Técnica de Traçado de Raios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - PPGEE, UFCG. Campina Grande, p. 69. 2020.
- [3] CISCO, **Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022**. 2019. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- [4] CISCO, **Cisco Annual Internet Report (2018-2023)**. 2020. [S.l.] Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- [5] DAHLMAN, E.; *et al.* 5G wireless access: Requirements and realization, **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 12, p. 42–47, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6979985.
- [6] GSMA, **The 5G Guide A Reference for Operators**. [S.l.]. 2019.
- [7] ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações. **Anatel aprova consulta pública para implementar o 5G**. 2020. <https://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article/171-manchete/2491-anatel-aprova-consulta-publica-para-licitar-faixas-de-frequencias-para-o-5g>. Acesso em: 16 maio 2020.
- [8] MALAR, J. P. Leilão do 5G: Conheça as 5 novas operadoras de telecomunicações do Brasil. **CNN Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/leilao-do-5g-conheca-as-6-novas-operadoras-de-telecomunicacoes-do-brasil/>. Acesso em: 04 jan. 2022.
- [9] RAUTIAINEN, T.; WÖLFLE, G.; e HOPPE, R. Verifying path loss and delay spread predictions of a 3D ray tracing propagation model in urban environment, **IEEE Vehicular Technology Conference**, [S.l.], v. 56, n. 4, p. 2470–2474, 2002. doi: 10.1109/vetecf.2002.1040665.
- [10] MELLO JUNIOR, Harold D. de.; CAVALCANTE, André M.; PELAES, Evaldo G.; e COSTA, João C. W. A. **Caracterização de Canais Rádio Móvel em Ambientes Exteriores: uma Abordagem utilizando Filtros Digitais**. Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, UFPA. Belém, 2004. Disponível em: http://www.lea.ufpa.br/producaocientifica/seminarios/i2ts2004_andre.pdf. Acesso em 21 ago. 2021.
- [11] MELLO, B. R. S.; PINNA, P. A.; DIAS, M. S.; FONSECA, F. J. B.; e MATOS, L. J. Measurements in vegetation and modeling of a radio mobile channel in an urban park, 2014. **International Telecommunications Symposium (ITS)**, [S.l.], p. 1-5, 2014. Doi: 10.1109/ITS.2014.6948014.
- [12] DERSCH, U.; e BRAUN, W. R. A physical mobile radio channel model, **IEEE Vehicular Technology Conference**, [S.l.], v. 40, n. 2, p. 289–294, 1991, doi: 10.1109/vetec.1991.140497.
- [13] SHARIF, Z.; e SHA'AMERI, A. Z. The application of cross correlation technique for estimating impulse response and frequency response of wireless communication channel, **2007 5th Student Conference on Research and Development, SCORED**, p. 0–4, dez. 2007. Doi: 10.1109/SCORED.2007.4451386.
- [14] HEMADEH, I. A.; SATYANARAYANA, K.; EL-HAJJAR, M.; e HANZO, L. Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget, **IEEE Communications Survey Tutorials**, v. 20, n. 2, p. 870–913, 2018. Doi: 10.1109/COMST.2017.2783541.
- [15] DAL BELLO, J. C. R.; SIQUEIRA, G. L.; e BERTONI, H. L. Theoretical analysis and measurement results of vegetation effects on path loss for mobile cellular communication systems, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v. 49, n. 4, p. 1285–1293, 2000. Doi: 10.1109/25.875242.
- [16] RIBEIRO, L. G.; MATOS, L. J.; CASTELLANOS, P. V. G.; MOURA, M. B.; MOTA, V. L. G.; e MEZA, W. D. T. Influence of vegetation on the outdoor-to-indoor mobile radio propagation in 700 MHz band, **Journal Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 427–438, 2019. Doi: 10.1590/2179-10742019v18i31628.
- [17] ČOJA, D.; NEŠKOVIĆ, N.; e NESKOVIĆ, A. Channel impulse response estimation using vector network analyzer, **2017 25th Telecommunications Forum, TELFOR 2017**, [S.l.], v. 2017-Jan., p. 1–4, 2018. Doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249304.
- [18] CASTELLANOS, P. V. G. **Modelamento de Efeitos de Multipercorso Atmosférico em Enlaces**

- Microondas em Visibilidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.
- [19] CAVALCANTE, A. M. **Simulador 3D Ray-Tracing Para Caracterização de Canais em Ambientes Móveis Celulares Simulador 3D Ray-Tracing Para Caracterização de Canais em Ambientes Móveis Celulares.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - PPGEE, UFPA, Belém, p. 146. 2003.
- [20] GONÇALVES, J. V. O. **Variabilidade do Sinal, Banda de Coerência e Espalhamento Temporal em Ambiente de Rádio Propagação Móvel em 3,5 GHz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, set. 2009.
- [21] MELLO JUNIOR, H. D. **Caracterização de Canais Multipercurso Utilizando Filtros Digitais Parametrizados com Técnicas de Traçado de Raios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - PPGEE, UFPA. Belém, p. 68. 2006.
- [22] BALANIS, C. A., **Antenna Theory Analysis and Design.** 2nd ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, INC, 1997. 958 p.
- [23] FAGIANI, A.; SODRÉ JÚNIOR, A. C. Caracterização da Perda de Percurso Indoor de Redes 5G em Ondas Milimétricas. **SBrT 2017**, São Pedro, n. 1, p. 3–6, set. 2017. Doi: 10.14209/sbrt.2017.35.
- [24] YACOUB, M. D. **Foundations of Mobile Radio Engineering.** 1st ed. Boca Raton: Routledge, 1993. 496 p.
- [25] BARIZON, B. M. **Medidas de Propagação em 2.4 GHz para o Planejamento de Redes Locais de Acesso sem fio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, abr. 2004.
- [26] NESKOVIC, A.; NESKOVIC, N.; PAUNOVIC, G. Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment. **IEEE Communications Surveys**, [S.l.], p. 2–12, 2000.
- [27] WAHL, R. An Introduction to the Urban Dominant Path Prediction Model. **AWE Communications**, p. 1–14, 2011.
- [28] MANI, F.; QUITIN, F.; OESTGES, C. Accuracy of depolarization and delay spread predictions using advanced ray-based modeling in indoor scenarios. **Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking**, [S.l.], v. 2011, n. 1, p. 1–9, 2011. Doi: 10.1186/1687-1499-2011-11.
- [29] WAHL, R.; WÖLFLE, G.; WEIGEL, R. Prediction of time variant spatial channel impulse responses for wireless ad-hoc networks. **2007 16th IST Mobile Wireless Communications Summit**, [S.l.], p. 1–5, 2007. Doi: 10.1109/ISTMWC.2007.4299229.
- [30] **AWE Communications.** 3D Intelligent Ray Tracing Model. [S.l.], p. 1–7, 2014. Disponível em: <http://www.awe-communications.com/Propagation/Indoor/IRT/index.htm>. Acesso em 20 maio 2021.
- [31] RAUTIAINEN, T.; HOPPE, R.; WÖLFLE, G. Measurements and 3D ray tracing propagation predictions of channel characteristics in indoor environments, **IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**, [S.l.], p. 0–4, 2007. Doi: 10.1109/PIMRC.2007.4394431.
- [32] 5G/NR - FR/Operating Bandwidth. **ShareTechnote.** Disponível em: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FR_Bandwidth.html#38_101_1_Table_5_3_2_1. Acesso em 4 set. 2021.
- [33] Huawei, 5G Spectrum, **5G Spectrum - Public Policy Position**, 2020. Disponível em: https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum_2020_v2.pdf?la=en. Acesso em 5 maio 2021.
- [34] GSMA, 5G Spectrum, **Public Policy Position**, 2016. Disponível em: https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/08/GSMA-5G-Spectrum-PPP_eng.pdf. Acesso em 5 maio 2021.
- [35] LATHI, B. P.; DING, Z. **Sistemas de Comunicações Analógicas e Digitais Modernos**, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [36] 5G NR Resource Block Definition and RBs Calculation. **Techplayon**, 2019. Disponível em: <https://www.techplayon.com/nr-resource-block-definition-and-rbs-calculation/>. Acesso em 4 set. 2021.
- [37] LI, M.; RUI, Y.; BU, Z. Fourier Transform Based Transmission Systems for Broadband Wireless Communications. **New Analytical Approaches and FTIR Strategies**, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/221911510_Fourier_Transform_Based_Transmission_Systems

- _for_Broadband_Wireless_Communications. Acesso em 10 set. 2021. Doi: 10.5772/15433.
- [38] 5G NR Cyclic Prefix (CP) Design. **Techplayon**, 2019. Disponível em: <https://www.techplayon.com/5g-nr-cyclic-prefix-cp-design/>. Acesso em 4 set. 2021.
- [39] ANATEL. **Siec Serviço Móvel Web**. Disponível em: <http://sistemas.anatel.gov.br/siec-servico-movel-web/>. Acesso em 10 jun. 2020.
- [40] NASA. **Earth Data Search**. Disponível em: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>. Acesso em 11 jun. 2020.
- [41] Open Street Map. **Open Street Map**. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/#map=4/-15.13/-53.19>. Acesso em 10 jun. 2020.
- [42] SODHRO, A. H.; PIRBHULAL, S.; SANGAIAH, A. K.; LOHANO, S.; SODHRO, G. H.; LUO, Z. 5G-based transmission power control mechanism in Fog computing for internet of things devices, **Sustainability**, Suíça, v. 10, n. 4, p. 1–17, 2018. Doi: 10.3390/su10041258.