



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e  
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

**Dissertação**

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS EM MINAS A CEU ABERTO: UMA  
ANÁLISE BASEADA EM TRAÇADO DE RAIOS**

**Pedro Henrique de Oliveira Gomes**

**Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil  
2019**

**Pedro Henrique de Oliveira Gomes**

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS EM MINAS A CEU ABERTO: UMA  
ANÁLISE BASEADA EM TRAÇADO DE RAIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.

Coorientador: Luis Guilherme Uzeda Garcia Ph.D.,

Ouro Preto  
2019

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633p Gomes, Pedro Henrique De Oliveira .  
Propagação de ondas milimétricas em minas a céu aberto: uma análise baseada em traçado de raios. [manuscrito] / Pedro Henrique De Oliveira Gomes. - 2019.  
74 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

Coorientador: Dr. Luis Guilherme Uzeda Garcia.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Sistemas de telefonia celular - Quinta Geração de sistema sem fio(5G). 2. Computação gráfica - Traçado de Raios. 3. Ondas de rádio - Ondas Milimétricas. I. Garcia, Luis Guilherme Uzeda. II. Segundo, Alan Kardek Rêgo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Pedro Henrique de Oliveira Gomes**

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS EM MINAS A CÉU ABERTO: UMA ANÁLISE BASEADA EM TRAÇADO DE RAIOS**

Membros da banca

Alan Kardek Rego Segundo - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Luis Guilherme Uzeda Garcia - Ph.D. - Nokia Bell Labs  
Saul Emanuel Delabrida Silva - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Robson Domingos Vieira - Doutor - Ektrum  
Mario Cuperno da Silva Júnior - Doutor - Universidade Federal de Sao João del Rei (UFSJ)

Versão final

Aprovado em 15 de julho de 2019

De acordo

Professor (a) Orientador (a)



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/05/2020, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0052657** e o código CRC **4597D121**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.003591/2020-16

SEI nº 0052657

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

*Aos meus familiares e amigos.*

# Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA. Ademais, gostaria de agradecer à minha família, especialmente Pai, Mãe e Dé, por sempre me apoiar e confiarem em mim; à minha namorada Aris e aos meus grandes amigos que sempre me ajudaram nesse desafio; ao time da Euphoria Formaturas, pelo apoio nessa reta final; e a todos os professores e pesquisadores, em especial, Alan e Uzeda, que tanto me ajudaram durante essa fase.

## Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

# PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS EM MINAS A CEU ABERTO: UMA ANÁLISE BASEADA EM TRAÇADO DE RAIOS

Pedro Henrique de Oliveira Gomes

Julho/2019

Orientadores: Alan Kardek Rêgo Segundo  
Guilherme Uzeda Garcia Ph.D.

Neste trabalho realizou-se uma análise do comportamento de ondas milimétricas, compreendidas na faixa de 30 a 300 GHz, em minas a céu aberto. Essas ondas serão utilizadas nos novos sistemas 5G. Como a análise das características da rede por meio de medições locais envolve um grande custo, empregou-se a técnica de *Ray tracing* para a realização deste trabalho. No estudo realizado com o software *Wireless Insite*, levou-se em consideração características como atenuação de sinal e potência de sinal recebido. Com o intuito de avaliar a viabilidade da utilização da tecnologia 5G em minas de céu aberto, foram analisados o impacto do sombreamento e obstrução de sinais e o comportamento da propagação desses sinais ao longo dos anos, à medida que a cava e o entorno da mina são modificados pela atividade de exploração mineral, de modo a demonstrar a viabilidade da utilização dessa tecnologia nas minas. Os resultados obtidos neste trabalho podem servir para implantar melhorias nas minas, como também para realizar previsões de comportamento das redes já existentes.

**Palavras-chave:** palavra1, Traçado de Raios, Ondas Milimétricas.

**Macrotema: Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema: ; Área Relacionada da Vale: .**

## **Abstract**

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

### MILIMETER WAVES PROPAGATION IN OPEN PIT MINES: A ANALYSIS BASED ON RAY TRACING

Pedro Henrique de Oliveira Gomes

July/2019

Advisors: Alan Kardek Rêgo Segundo  
Guilherme Uzeda Garcia Ph.D.

This project analyzes the behavior of millimeter waves in open pit mines. Millimeter waves comprises the frequencies between 30 to 300 GHz. Millimeter waves are those that will be used in the 5G systems, which are more and more becoming reality. As the analysis of millimeter waves characteristics doing local measurements involves a great cost, the technique of Ray-Tracing will be used to carry out this work. The analysis, which will be carried out using the software Wireless Insite, will design features such as received power and path loss. To evaluate the viability of the use of 5G technology in open pit mines, the impact of shadowing and obstruction of signals were analyzed along the years, showing the variation according the modifications in the terrain. These transformations in the terrain improve the viability of this technology in those scenarios. From these data, mine improvements could be proposed and predictions made of the behavior of existing networks to be deployed in open-pit mines.

**Keywords:** key1, Ray tracing, Millimeter Waves.

**Macrotheme: Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme: ; Related Area of Vale:.**



# Lista de Figuras

Figura 2.1	Espectro da Tecnologia 5G. . . . .	21
Figura 3.1	Vista do Terreno Utilizado da Mina de Brucutu . . . . .	35
Figura 3.2	Modelos utilizados: Caçamba Levantada, Cheio e Vazio, respectivamente. . . . .	38
Figura 3.3	Vista Aérea da Mina de Brucutu - Abril 2019. . . . .	39
Figura 4.1	Resultados para a rota de receptores utilizando 795 MHz . . . . .	42
Figura 4.2	Resultados para a rota de receptores utilizando 2577 MHz . . . . .	43
Figura 4.3	<i>Excess Path Loss</i> para 28 GHz, em função da distância, altura do transmissor e configuração do caminhão. . . . .	43
Figura 4.4	Vista Superior dos Elementos do Cenário Caminhão-Caminhão . . . . .	44
Figura 4.5	<i>Excess Path Loss</i> causado pelo Caminhão Obstrutor . . . . .	45
Figura 4.6	Função de distribuição acumulativa do <i>Excess Path Loss</i> para antenas de 5 e 10 m a 795 MHz, 2577 MHz e 28 GHz. . . . .	45
Figura 4.7	Vista Superior dos Elementos do Cenário Caçamba Erguida . . . . .	47
Figura 4.8	<i>Excess Path Loss</i> no cenário de Caçamba Erguida com $h_{tx} = 10$ m . . . . .	48
Figura 4.9	<i>Excess Path Loss</i> no cenário de Caçamba Erguida com $h_{tx} = 20$ m . . . . .	48
Figura 4.10	Evolução do LOS na Mina de Brucutu, nos anos de 2012, 2015 e 2017, da esquerda para a direita, respectivamente . . . . .	49
Figura 4.11	Evolução da Porcentagem LOS na Mina de Brucutu, considerando 01 e 02 Transmissores. . . . .	50
Figura 4.12	Evolução do <i>Excess Path Loss</i> , de 2012 para 2017, levando em conta o modelo X3D . . . . .	51
Figura 4.13	Função de distribuição acumulativa do <i>Excess Path Loss</i> para 28GHz em anos distintos. . . . .	52
Figura 4.14	Potência Recebida para os Pontos com condição de visada direta (VLOS) e os pontos sem visada (NLOS) . . . . .	53
Figura B.1	Vista Externa do Prédio ITV-UFOP . . . . .	61
Figura B.2	Simulação da Potência de Sinal Recebido em todo o prédio de acordo com cada Transmissor . . . . .	62
Figura B.3	Simulação da Potência de Sinal Recebido para os Receptores Marcados . . . . .	63

Figura B.4 Potência de Sinal Recebida Simulada e Medido por cada ponto de recepção de acordo com o transmissor . . . . .	65
---	----

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Principais Características dos Modelos . . . . .	34
Tabela 4.1	Cenário Caminhão-Caminhão: <i>Excess Path Loss</i> (em dB) para 95% de confiabilidade (Análise Tradicional) . . . . .	46
Tabela 4.2	Cenário Caminhão-Caminhão: <i>Excess Path Loss</i> (em dB) para 99% de confiabilidade (Missão Crítica) . . . . .	46
Tabela 4.3	Cenário Caçamba Erguida - <i>Excess Path Loss</i> (em dB) para 95% de confiabilidade - Análise Tradicional . . . . .	48
Tabela 4.4	Cenário Caçamba Erguida - <i>Excess Path Loss</i> (em dB) para 99% de confiabilidade - Missão Crítica . . . . .	49
Tabela B.1	Posição dos Transmissores . . . . .	62
Tabela C.1	Tempos Médios de Simulação para algumas configurações testadas . . . . .	67

# Lista de Siglas e Abreviaturas

**ANN** Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Networks)

**DXF** Drawing Exchange Format

**LOS** Potência Isotrópica Radiada Equivalente (Effective Isotropic Radiated Power)

**ENCOM** Conferência Nacional em Comunicações Redes e Segurança da Informação

**EPC** Cálculo de Caminho Exato (Exact Path Calculator)

**FDTD** Domínio do Tempo da Diferença Finita (Finite-difference time-domain)

**GO** Ótica Geométrica (Optical Geometric)

**GPU** Unidade de Processamento Gráfico (Graphics Process Unit)

**IEEE** Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

**LOS** Line of Sight

**mmW** Ondas Milimétricas (millimeter waves)

**MoM** Método dos Momentos (Method of Moments)

**NLOS** Non Line of Sight

**NR** New Radio

**PIMRC** International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications

**QoS** Qualidade de Serviço

**RAN** Radio Access Network

**SBR** Método de Tiros e Saltos (Shooting and Bouncing Ray)

**SNR** Razão Sinal Ruído (Signal Noise Ratio)

**USGS** United States Geological Survey

**UTD** Teoria Uniforme da Difração (Uniform Theory of Diffraction)

**V2I** Vehicle-to-infrastructure

**VP** Vertical Plane

# Lista de Símbolos

$h_{tx}$  Altura do Transmissor

$N_F$  Número de Faces

$N_R$  Número de Reflexões

$N_T$  Número de Transmissões

$S$  Condutividade

$t_C$  Tempo de Computação

$\varepsilon$  Permissividade Relativa do Solo

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Justificativa . . . . .	16
1.2	Objetivo . . . . .	16
1.3	Contribuições do Trabalho . . . . .	17
1.4	Estrutura do Trabalho . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica e Fundamentação Científica</b>	<b>19</b>
2.1	Indústria 4.0 . . . . .	19
2.2	Sistemas 5G . . . . .	20
2.3	Ondas Milimétricas . . . . .	21
2.4	Características de Propagação . . . . .	22
2.5	Modelos de Propagação . . . . .	23
2.5.1	Modelos Teóricos . . . . .	23
2.5.2	Empíricos e Estatísticos . . . . .	24
2.5.3	Determinísticos . . . . .	24
2.6	Predição de Canais e Traçado de Raios . . . . .	25
2.7	Motivação para Aplicações na Mineração . . . . .	27
2.8	Condições de Visada em Minas a céu aberto . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Metodologia Proposta</b>	<b>29</b>
3.1	Wireless Insite . . . . .	29
3.1.1	Modelos de Propagação Utilizados . . . . .	31
3.1.2	<i>Vertical Plane</i> . . . . .	31
3.1.3	Full 3D . . . . .	32
3.1.4	<i>X3D</i> . . . . .	33
3.2	Procedimentos . . . . .	34
3.2.1	Validação Comparativa utilizando o Método <i>Vertical Plane</i> . . . . .	34
3.2.2	Análise de sombreamento causado por maquinário . . . . .	36
3.3	Análise Temporal de Visada Direta em um Mina a Céu Aberto . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>41</b>
4.1	Validação Comparativa utilizando o Método <i>Vertical Plane</i> . . . . .	41
4.2	Análise de sombreamento causado por maquinário . . . . .	42
4.2.1	Sombreamento Caminhão-Caminhão . . . . .	44
4.2.2	Caçamba Erguida . . . . .	46
4.3	Análise Temporal de Visada Direta em um Mina a Céu Aberto . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>54</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	55
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>56</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Código utilizado na conversão de ASCII (.txt) para GeoTIFF (.tif)</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Campanha de Medições no Prédio ITV-UFOP</b>	<b>61</b>
B.1	Conhecimento do Ambiente . . . . .	61
B.2	Simulações . . . . .	61
B.3	Campanha de Medições . . . . .	63
B.4	Processamento dos Resultados . . . . .	64
<b>C</b>	<b>Desafios Encontrados</b>	<b>66</b>



# 1. Introdução

A mineração é uma das atividades mais antigas existentes e continua sendo essencial para a sociedade moderna. Nesse segmento, assim como em todas as áreas do mercado, busca-se melhores resultados a cada dia, realizando-se uma série de investimentos, com o objetivo de otimizar cada vez mais os processos, reduzir os custos e aumentar a segurança dos colaboradores.

Com a busca constante por melhorias nos processos de mineração, a utilização de equipamentos não tripulados tem se tornado cada vez mais constante nas minas. Máquinas e outros tipos de equipamentos enviam dados, áudios, vídeos e os mais variados tipos de informação via rádio, o que exige maior capacidade dos transmissores e dos receptores, assim como do meio. Dessa maneira, a qualidade e a disponibilidade das redes sem fio tornaram-se um fator essencial e determinante para o sucesso das mineradoras.

Nesse sentido, saber como se comportam os sistemas sem fio (*wireless*) é fato de extrema importância. O estudo do canal ajuda a entender a propagação dos sinais no meio, podendo estabelecer os parâmetros para indicar a viabilidade ou não da implantação de um sistema. Além disso, esse estudo é de extrema importância para garantir um sistema seguro e confiável (SARKAR *et al.*, 2003). Entretanto, devido à dinâmica de rápidas transformações no ambiente de uma mina, com o relevo se alterando diariamente devido à extração de minério, tanto a curto quanto a longo prazo, o estudo dos canais de propagação em minas se torna uma missão desafiadora.

O desafio da caracterização dos canais das minas se torna ainda maior no cenário atual, em que novas tecnologias estão sendo estudadas para serem utilizadas na mineração, e muitas delas baseadas em ondas milimétricas, o que torna o comportamento ainda mais imprevisível, uma vez que pequenos obstáculos ou características dos objetos podem resultar em comportamento não muito previsível das ondas. Ondas milimétricas são grandes aliadas para aumento da capacidade das redes, mas exige-se, quase sempre, condições de visada direta (LOS ou *Line of Sight*). Estudos recentes mostram que as diversas reflexões ajudam a minimizar a restrição. As medições locais possuem grande importância para se caracterizar o comportamento das ondas porém, devido ao alto valor dos equipamentos e do tempo da realização das análises, possuem custo muito elevado (RANGAN *et al.*, 2014).

Em sistemas de comunicação por ondas milimétricas, o espectro disponível para uso é incomparável aos das redes existentes no mercado hoje. O espectro não licenciado em 60 GHz oferece de 10 a 100 vezes mais espectro do que é disponível nas faixas não licenciadas de 900 MHz, 2.4 GHz e 5 GHz. Devido à essa disponibilidade, taxas mais elevadas podem ser atingidas e mais recursos podem ser compartilhados entre os usuários da rede.

Na mineração, a análise da rede demanda a instalação de sensores específicos. Por se tratar de um ambiente que poderia colocar em risco os colaboradores que fossem realizar esse serviço, em alguns tipos de medições específicos, como por exemplo utilizando-se os ca-

minhões, necessita-se de uma parada dos equipamentos para tal trabalho ocorrer. Essa parada da operação, pelo fato da mineração ser um processo contínuo, significa toneladas de minério a menos para a companhia, o que implica em um custo alto para a empresa. Esse empecilho dá espaço para a utilização de métodos de simulação, como o Traçado de Raios (*Ray Tracing*), um método bastante utilizado para caracterização de canais e que garante resultados bem próximos à realidade, levando em conta a frequência, variação do tempo e comportamento do espaço (KNORZER *et al.*, 2007).

Neste projeto, busca-se apresentar uma solução para o cenário desafiador e particular das minas, visando a simulação dos ambientes de minas a céu aberto, por meio de análise do comportamento dos sinais de ondas milimétricas, com confiabilidade e sem causar paradas na produção.

## **1.1. Justificativa**

A utilização das ondas milimétricas visa a atender a demanda crescente por acesso a informações. Em resumo, como as condições de LOS tendem a ser favoráveis em minas a céu aberto, o uso de ondas milimétricas e dos futuros sistemas 5G pode conjugar capacidade virtualmente ilimitada com a cobertura necessária. Assim, o desenvolvimento deste trabalho visa garantir melhores resultados para as implementações atuais e futuras de redes sem fio, garantindo melhorias na comunicação dos equipamentos e na transmissão de dados em minas a céu aberto. Nesse ambiente, as condições de visada direta são, em geral, favoráveis, mas nenhum trabalho sistemático quantitativo foi desenvolvido até então.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo principal deste projeto é avaliar a aplicabilidade de sistemas baseados em ondas milimétricas, gerar recomendações técnicas e balizar novos estudos de campo, por meio de simulações computacionais. Para se chegar a esse objetivo, outros objetivos intermediários devem ser alcançados, como por exemplo o estudo da evolução temporal do LOS ao longo da vida da mina e a influência do maquinário nas redes. Além disso, busca-se analisar a confiabilidade do sistema quanto às informações dos transmissores e receptores, tais como localização, condições do ambiente, características dos materiais e qualidade dos sinais enviados. O projeto também possui um objetivo secundários de estudar o impacto das obstruções V2I (veículo-*infraestrutura*, do inglês *vehicle-to-infrasctruture*) nas redes de uma mina a céu aberto.

A hipótese a ser validada ou rejeitada neste projeto é se as condições de LOS serão altas ao longo da vida da mina e se as reflexões podem ajudar a contornar os problemas das regiões sem visada direta (NLOS). Tratando-se de ondas milimétricas, um dos principais fatores que pode prejudicar uma transmissão de qualidade é a interferência causada por terrenos ou objetos, o que torna a análise realizada neste trabalho de extrema importância.

### 1.3. Contribuições do Trabalho

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, dois artigos foram aprovados em Congressos. As subseções seguintes falam dos trabalhos desenvolvidos.

#### ***Evaluation of Shadowing Caused by Mining Machinery in V2I Communications***

O primeiro artigo foi apresentado no *PIMRC 2018 – IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, mais precisamente para o *International Workshop on V2X Communications and Channel Modeling*, que aconteceu em Setembro de 2018, em Bolonha, Itália.

Este artigo remete a Seção 4.2 do presente trabalho, e analisou os efeitos do sombreamento causado por caminhões fora de estrada na propagação do sinal em minas a céu aberto. Foi utilizado o *ray tracing* para executar simulações e analisar parâmetros, como o *Excess Path Loss*. Os resultados mostraram considerável obstrução pelo maquinário. Assim, a partir desses dados, foram propostas melhorias na comunicação de mineração para as redes existentes e para as futuras.

**Autores:** Pedro Henrique de Oliveira Gomes, Gabriel Guieiro, Erika Portela Lopes de Almeida, Luis Guilherme Uzeda Garcia.

#### ***Comparação entre Medição de Sinais e Predição por Simulador Baseado em Traçado de Raios***

O segundo artigo foi submetido ao *ENCOM 2018 - VIII CONFERÊNCIA NACIONAL EM COMUNICAÇÕES, REDES E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO, At Salvador/BA - Brazil*, que aconteceu em Outubro de 2018, em Salvador, Bahia.

Neste trabalho foi criada uma rede sem fio indoor, para verificar o comportamento das ondas e ver como ela se comportaria no simulador. A cobertura da rede foi analisada por meio de medições de potência de sinal recebido e simulações baseadas em traçado de raios. Por fim, os resultados foram comparados utilizando a raiz do erro quadrático médio.

**Autores:** Pedro Henrique de Oliveira Gomes, Gabriel Guieiro, Guilherme Gaigher Netto, Érica Silva Pinto, Marcelo Eustáquio Hamanaka Silva, João Henrique Rodrigues Costa, Alan Kardek Rêgo Segundo and Luis Guilherme Uzeda Garcia.

#### ***Outros***

Além destes, alguns outros trabalhos já foram submetidos e estão aguardando aprovação ou ajustes finais para serem divulgados. Um deles é um estudo abrangente de propagação de

rádio em minas a céu aberto, onde foram discutidos resultados obtidos em uma extensa campanha de medição à luz de sua implicação no projeto de redes sem fio confiáveis neste tipo de ambiente. Foram também desenvolvidos um modelo para a predição e realizadas simulações, remetendo à Seção 4.2 deste trabalho. Já outro artigo faz uma análise das condições de visada direta em Minas a Céu aberto, mostrando como a sua evolução é um grande indício da aplicabilidade dos 5G nesse tipo de ambiente.

## **1.4. Estrutura do Trabalho**

O trabalho, após essa breve introdução, é organizado da seguinte forma. Inicialmente, no Capítulo 02, é mostrado um breve histórico de como a indústria vem se comportando (Seção 2.1) e a importância das tecnologias 5G nesse processo (Seção 2.2), focando principalmente nas frequências correspondentes às ondas milimétricas (Seção 2.3). É mostrado, então, um breve estudo sobre o estudo de propagação de ondas (Seção 2.4) e dos modelos utilizados para se estudar essas propagações (Seção 2.6). O modelo de Traçado de Raios, que apresenta as melhores características para este trabalho, é então explicado mais profundamente na Seção 2.6.

Como o trabalho foi desenvolvido a partir de simulações, mostram-se as características do software, na primeira seção do Capítulo 03. Após isso, na seção 3.2 mostra-se a importância das aplicações das simulações na mineração, e como se comportam (Seção 3.3). No Capítulo 04, mostra-se a metodologia do trabalho, que muito diz sobre as simulações. Mostram-se os procedimentos adotados, incluindo a calibração do software e os estudos que foram realizados.

Logo em seguida, no Capítulo 05, apresentam-se todos os resultados obtidos com o presente trabalho, para cada um dos diferentes cenários analisado, incluindo a calibração, a análise de sombreamento e a evolução temporal da visada direta. Por fim, chega-se à conclusão do trabalho (Capítulo 06), que além de destacar os principais resultados obtidos neste trabalho, mostra também sugestões de trabalhos futuros.

## 2. Revisão Bibliográfica e Fundamentação Científica

A medida que a tecnologia evolui, cada vez mais é necessário realizar a comunicação entre os sistemas, o que não é diferente na mineração. Devido à necessidade operacional de mobilidade, grande parte dessa comunicação é realizada sem fio e, nesse caso, estabelecer uma comunicação eficiente depende muito de entender o meio e as condições por onde essa informação é transportada.

Os sinais e as informações nas redes sem fio são carregados através de ondas de rádio, as quais são governadas pelas equações de Maxwell. Mas prever o comportamento analítico para essas ondas em condições reais é uma tarefa quase impossível. As ondas de rádio chegam a um receptor por diferentes direções, amplitudes e atrasos, o que é denominado Propagação de Múltiplos Caminhos. A soma da contribuição de cada um desses caminhos gera um Canal de Rádio (SARKAR *et al.*, 2003).

Saber como se comporta um canal é importante para o projeto de novos sistemas e para analisar o comportamento dos sistemas que já existem, bem como para avaliar os padrões já existentes no mercado. Características como largura de banda, intervalo de guarda e espaçamento de sinais são características essenciais que devem ser analisadas nesses canais (KNORZER *et al.*, 2007). A partir daí, chega-se na modelagem dos canais de propagação, que tem como objetivo principal a estimação da intensidade do sinal e de campo quando algumas características do sistema são fornecidas, como por exemplo frequência, características do terreno, tamanho das antenas, características do meio, entre outros (YUN e ISKANDER, 2015).

Os canais de propagação dos ambientes de mineração a céu aberto ainda não foram estudados a fundo na bibliografia, o enfoque principal tem sido em minas subterrâneas, ambientes internos e em grandes centro urbanos, o que torna a tarefa desafiadora e pioneira, devido às inúmeras particularidades do ambiente. Entretanto, entender o que já foi feito e o que vem sendo realizado no âmbito do estudo de canais é fator essencial para se propor novas soluções a esse desafio das mineradoras. Com base nisso, buscou-se entender quais os avanços que já foram obtidos na área.

Para guiar o estudo, focou-se em algumas áreas essenciais para o desenvolvimento do projeto: Indústria 4.0; Sistemas 5G; características e modelos de Propagação; Ondas Milimétricas, devido às tecnologias emergentes na faixa de frequência dessas ondas; e o Traçado de Raios (*Ray Tracing*), apontada como uma boa técnica para modelar canais de ondas milimétricas (KNORZER *et al.*, 2007).

### 2.1. Indústria 4.0

Em uma busca contínua por competitividade e produtividade, as indústrias vem promovendo a inovação de produtos, serviços e otimização de processos internos. Esse novo universo de possibilidades é o que chamamos de Indústria 4.0.

Essa denominação foi utilizada pela primeira vez na Alemanha para designar a evolução para uma indústria automatizada, na qual os meios de fabricação e os produtos estão interconectados permitindo que, decorrentes da troca de informações entre eles, decisões de produção sejam tomadas de maneira autônoma pelas ferramentas e sistemas da fábrica. (ANDERL, 2014), (VALDEZA *et al.*, 2015), (BARTEVYAN, 2015).

Ao longo do tempo é possível destacar algumas tecnologias, que foram adotadas pela indústria e que representaram uma verdadeira ruptura na organização dos sistemas de produção. Pode-se dividir essa evolução em três eras industriais: primeira era, com a utilização de máquinas a vapor como propulsor da indústria (século XVII); segunda era, com a utilização da eletricidade (final do século XIX); e a terceira era, com a utilização dos computadores e da automação (a partir o século XX) (BARTEVYAN, 2015).

O conceito de indústria 4.0 delimita uma nova era da indústria. Essa era é definida pela utilização de sistemas industriais inteligentes, que podem tomar decisões de fabricação autônomas, apoiados em estruturas complexas de tratamento e manipulação de dados. Os dados são gerados pela interconexão dos meios de produção com os produtos finais, bem como pela conexão com o ambiente interno e externo da indústria (ANDERL, 2014), (VALDEZA *et al.*, 2015), (BARTEVYAN, 2015).

A interconexão entre a operação e o produto final são colocados em destaque neste conceito pois é esta troca de informações entre a operação e o produto o que permite a tomada de decisões autônomas dos meios de produção. Ou seja, os meios industriais receberiam vários dados provenientes de sensores da planta de montagem e/ou internos ao produto, além de informações e instruções também nele gravadas, permitindo assim o cálculo da próxima operação a ser realizada. Podendo ser esta operação uma sequência normal de montagem ou uma ação suplementar, decorrente, por exemplo, de uma anomalia identificada por um dos sensores.

Com a ascensão da Indústria 4.0, a comunicação sem fio tem se tornado uma tendência em ambientes industriais, poupando recurso e possibilitando novas aplicações quando comparada às tecnologias cabeadas (BERTELLI, 2017). O avanço das telecomunicações aliado ao desenvolvimento de tecnologias relacionadas a sistemas de informações, tratamento e manipulação de dados já proporciona uma oferta, aparentemente ilimitada, de produtos, sistemas e serviços. Essa aparente oferta ilimitada de serviços ganhou uma tecnologia a mais, que conta com taxas de transmissão altíssimas, proporcionando inúmeras aplicações: são os Sistemas 5G.

## **2.2. Sistemas 5G**

Cada vez mais, as aplicações de redes sem fio exigem latência extremamente baixa e maiores taxas de transmissão. Devido a isso, cada vez mais a tecnologia sem fio de quinta geração, o 5G, vem ganhando mais atenção, pois, embora possa também operar em faixa sub 6 GHz, poderá ser uma alternativa à essa espectro, que é muito utilizado hoje e provavelmente

não suportará essa demanda Abdin *et al.* (2017). A visão desses sistemas consiste em fornecer taxas de dados muito altas (tipicamente da ordem de Gbps), latência extremamente baixa (cerca de 1 ms), aumento múltiplo na capacidade da estação base e melhoria significativa na qualidade de serviço percebida pelos usuários (QoS — *Quality of Service*) (AGIWAL *et al.*, 2016). O espectro pensado para a tecnologia 5G é mostrado na Figura 2.1 (QUALCOMM, 2018). Na imagem, a Sigla NR remete a *New Radio*, é a denominação técnica da rede de acesso (RAN em inglês) de rádio 5G.

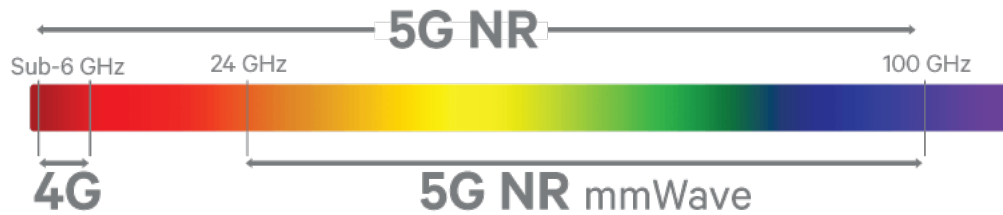


Figura 2.1: Espectro da Tecnologia 5G.

Embora ainda não esteja totalmente definido, vários esforços estão sendo feitos para se definir os principais requisitos do 5G, desenvolver padrões e realizar testes de tecnologia o mais rápido possível. Normalmente, essas atividades são realizadas em série, mas há um desejo de completar essas tarefas em paralelo para que as implantações comerciais do 5G comecem até 2020. O 5G não será uma melhoria incremental em relação aos seus predecessores, ele pretende ser um salto revolucionário em termos de taxas de transporte de dados, latência, conectividade maciça, confiabilidade da rede e eficiência energética. Essas características são essenciais para a realização de conectividade de altíssima velocidade, para a Internet das Coisas, para realidade virtual aumentada e para internet tátil (SHAFI *et al.*, 2017). Nesse sentido, o 5G pode ser de grande valia para a mineração, uma vez que cada vez mais vê-se a inserção de sistemas autônomos nesse meio.

Espera-se que os requisitos do 5G sejam atendidos por um novo espectro nas bandas de micro-ondas, entre 3,3 e 4,2 GHz, e também utilize grandes faixas de banda disponíveis em bandas de ondas milimétricas (30 a 300 GHz), aumentando as possibilidades de utilização do espectro e gerando novas formas de onda que proporcionam escalabilidade e flexibilidade para atender às diferentes demandas dos serviços 5G. Ao contrário do tamanho único das redes principais de 4G, a rede central 5G deve ser flexível e adaptável Shafi *et al.* (2017).

### 2.3. Ondas Milimétricas

Ondas milimétricas compreendem a faixa de frequência entre 30 e 300 GHz, podendo oferecer 200 vezes ou mais alocações de espectro do que as alocações atuais (RANGAN *et al.*, 2014). As ondas milimétricas são as novas apostas para se atingirem grandes taxas de transmissão de dados, utilizando-se direcionamento e multiplexação espacial das antenas. A ideia

básica da multiplexação é utilizar sinais diferentes, que chegam ao receptor com níveis semelhantes de qualidade, RSRQ (Reference Signal Received Quality). O ganho de multiplexação traz um aumento de vazão da rede sem fio, uma vez que aumenta a taxa média de transferência do usuário fazendo uso de dois sinais independentes transmitidos para o mesmo usuário (SALES e NUNES, 2015).

Todavia, a utilização das ondas milimétricas esbarra em obstáculos técnicos. Apesar de compensar as atenuações de sinal utilizando antenas diretivas, essa faixa é altamente vulnerável ao sombreamento, resultando em interrupções ou transmissões intervaladas, afetando a qualidade dos canais. Desse modo, o maior obstáculo desse conjunto de ondas são os bloqueios de sinal e sombreamentos (variação de sinal aleatória causada pela obstrução por objetos), que ocasionam regiões sem visada direta (NLOS - *Non Line of Sight*), com um maior *path loss*. (RANGAN *et al.*, 2014).

As ondas milimétricas já vêm sendo utilizadas em aplicações comerciais e militares, como sensoriamento remoto, rádio para astronomia, imagens de satélite, radares e comunicações com grandes taxas de dados. Para estabelecer essas comunicações, é necessária uma Razão Sinal-Ruído (SNR) aceitável no receptor. Porém, devido às atenuações e perdas de sinal das ondas milimétricas, é extremamente importante saber como as ondas se propagam no meio em que estão sendo aplicadas. Informações sobre a propagação em conjunto com antenas apropriadas podem fazer com que a qualidade do sinal recebido seja maximizada e, então, altas taxas de transferências sejam atingidas (NEEKZAD *et al.*, 2007).

## 2.4. Características de Propagação

As ondas de rádio são afetadas pelo mesmos fenômenos de todas as ondas eletromagnéticas, tais como reflexão, refração, difração, absorção, polarização e dispersão. Os modelos de canais de rádio, particularmente em ambientes externos, são dependentes principalmente da reflexão, difração e dispersão. Por isso, é dado um enfoque a essas três características nesta seção. Em ambientes internos a absorção domina, e na atmosfera a refração se torna mais relevante.

A reflexão ocorre quando a onda encontra um objeto que tem grandes dimensões quando comparado ao comprimento de onda. Quando ocorre a reflexão, parte dela é refratada, perdendo um pouco da intensidade do sinal. Tanto a reflexão como refração são dependentes das propriedades do meio e dos materiais, bem como do ângulo de incidência, polarização da onda e, principalmente, da frequência de propagação (SARKAR *et al.*, 2003). As propriedades dielétricas dos materiais variam de acordo com as faixas de frequências às quais são submetidos, o que pode gerar distorções nos caminhos de propagação, o que deve ser analisado com bastante cuidado para não se criarem modelos que não refletem de forma adequada a realidade (MOLISCH, 2005).

Já a difração é quando parte da propagação da onda é obstruída por alguma superfície.



Em altas frequências, a difração é dependente da geometria do objeto, e da amplitude, fase e polarização da onda incidente (SARKAR *et al.*, 2003). A perda por difração é proporcional à frequência (MOLISCH, 2005). Ou seja, mantidas as dimensões do obstáculo, frequências mais altas tendem a manter a propagação mais retilínea, enquanto frequências mais baixas se espalham mais.

Por último, a dispersão ocorre quando tem-se um ambiente em que a dimensão dos objetos é pequena comparada ao comprimento das ondas e o número de obstáculos por unidade de volume é alto, causando grande espalhamento dos raios, tornando mais complicada a análise da intensidade no meio (SARKAR *et al.*, 2003).

## **2.5. Modelos de Propagação**

Estudar o comportamento dos canais de rádio ajuda a entender algumas características como ângulo de incidência, atraso de percurso, atenuação e outras características. Vários modelos aplicam processos estocásticos para descrever a intensidade do sinal recebido. Essas medidas podem ocorrer tanto para espaços fechados quanto a céu aberto e demandam, em sua essência, uma vasta gama de medições.

Pensando na variedade de modelos criados, o estudo foi subdividido em três categorias principais: modelos Teóricos, modelos Empíricos e Estatísticos e modelos Determinísticos. Cada uma dessas categorias, e alguns modelos relevantes pertencentes a elas, serão explicados nas seções seguintes.

### **2.5.1. Modelos Teóricos**

O modelo mais simples de propagação são as Equações de Friis, publicadas em 1946. Esse modelo apresenta resultados aceitáveis, e computacionalmente rápidos, para propagação em campo aberto, mas quando existem objetos na zona de cobertura entre o transmissor e o receptor, o modelo falha, não sendo o mais aconselhável para propagação de ondas de rádio (SARKAR *et al.*, 2003). Os componentes de reflexão e difração, relacionados tanto aos objetos quanto as características do terreno e dos objetos presentes, têm, então, que ser calculados para corrigir as falhas.

Como a difração é um dos principais problemas do modelo anterior, outros modelos que tentavam solucionar esse problema foram propostos na literatura. No Modelo de Bullington, por exemplo, vários obstáculos são combinados gerando apenas um obstáculo resultante e calculando a perda por difração de maneira mais simplificada. Já um outro modelo, conhecido como modelo de Longley-Rice ((LONGLEY e RICE, 1968)), é até hoje utilizado para modelos de propagação em terrenos irregulares. Esse modelo já leva em conta uma série de parâmetros da rede sem fio, como frequência, distância entre receptores e transmissores, tamanho das antenas e polarização, como também do meio, como irregularidades do terreno, condutividade ( $S$ )

e permissividade relativa do solo ( $\epsilon$ ), índice de refração da superfície e clima local. Todavia, os resultados são mais demorados (YUN e ISKANDER, 2015).

### 2.5.2. Empíricos e Estatísticos

Outros modelos que garantem resultados computacionais relativamente rápidos, com certa satisfatoriedade nos resultados, são os modelos empíricos e estatísticos. O principal problema desse tipo de modelo são que, em sua maioria, eles são realizados para determinados locais e seus resultados são válidos apenas para ambientes que possuem certa semelhança com os locais originais. Outro grande problema, é que esses modelos não apresentam boa acurácia nas relações de espaço e tempo, que são características básicas necessárias para se desenvolver simulações (YUN e ISKANDER, 2015). Essa última informação elimina a possibilidade de se utilizar algum desses modelos no projeto em questão, mas entender ao menos como funcionam os principais modelos pode ser uma chave para que possa chegar a novas conclusões na hora de se escolher um modelo para a simulação. Por isso, algumas características de alguns modelos empíricos e estatísticos mais utilizados na literatura são mostradas a seguir.

Segundo Sarkar *et al.* (2003), o modelo Okamura é o mais simples e com maior acurácia dentre os primeiros modelos de canais para sistemas de celulares. Devido a sua praticidade, tornou-se o mais utilizado no planejamento de sistemas no Japão, porém sua principal desvantagem é a resposta lenta quando submetido a mudanças no terreno. Já o modelo empírico conhecido como modelo Hata é baseado nos dados de perda do modelo Okamura, e sua principal aplicação envolve sistemas com grandes células, na faixa de 150 a 1500 MHz, mas não é recomendado para sistemas de comunicação que cobrem uma área menor que 1 km. Por último, o modelo *Dual-Slope* é baseado em um modelo de dois raios, utilizado em ocasiões em que a altura da antena é várias vezes maior que o comprimento de onda do sistema, sendo recomendada para regiões sem visada direta.

### 2.5.3. Determinísticos

Os modelos Determinísticos são baseados na teoria da propagação de ondas eletromagnéticas e são dependentes da região onde a propagação é realizada. Mas diferentemente dos modelos Empíricos e Estatísticos, não são necessárias medições em grande número, apenas deve-se conhecer detalhadamente as características do ambiente. Quando mais características forem conhecidas, melhor será o modelo.

Quatro dos modelos determinísticos mais utilizados são descritos a seguir:

- **Traçado de Raios (*Ray Tracing*):** utilizados para estimar a atenuação de um sinal ao longo de um terreno. Esse modelo fornece uma visão geral das características do canal, sendo capaz de realizar cálculos satisfatórios para grandes estruturas, com recursos computacionais razoáveis (NEEKZAD *et al.*, 2007). A predição da propagação por Traçado

de Raios se baseia em uma aproximação ótica/geométrica do comportamento dos sinais de rádio. Desse modo, para frequências elevadas, em que o comportamento se torna mais próximo do comportamento ótico/geométrico, o método de Traçado de Raios se torna mais exato.

- **Domínio do Tempo de Diferença Finita (FDTD):** alternativas numéricas para resolver as equações de Maxwell, tendo a vantagem de ter maior acurácia quando comparado ao *Ray Tracing* e por prover uma solução completa para qualquer ponto em um mapa, resultando em informações completas sobre sinal e cobertura. Porém, por ser um método numérico, exige grandes esforços computacionais quando comparados ao *Ray Tracing* (SARKAR *et al.*, 2003). Assim, sua utilização se torna inviável na análises de grandes áreas, como nas minas a céu aberto.
- **Métodos dos Momentos (MoM):** modelos numericamente exatos que são utilizados para pequenos objetos. Sua precisão é maior à medida que a segmentação seja reduzida, impossibilitando os cálculos para grandes objetos ou áreas (YANG *et al.*, 1998) ; (DE BAC-KER *et al.*, 1996).
- **Baseados em Redes Neurais Artificiais (ANN):** apresentam as vantagens de prover boas aproximações para ambientes com ruído e o fato de aceitar paralelismo, levando a soluções mais rápidas. Porém, um dos principais problemas é o fato da convergência (ou seja, o treinamento/aprendizado das soluções) ser, na maioria das vezes, demorada, e soluções imprevisíveis poderem ser geradas durante a fase de aprendizado (SARKAR *et al.*, 2003).

Devido às suas características, o modelo *Ray Tracing* foi o escolhido para o presente trabalho e será mais detalhado na Seção 2.5.

## 2.6. Predição de Canais e Traçado de Raios

Simular os canais de propagação com *Ray Tracing* pode prever o sucesso de uma operação antes de ela ser iniciada, e por ser bem próxima da realidade, pode-se poupar vários investimentos ao longo do anos (KNORZER *et al.*, 2007). Um exemplo disso, são as previsões do comportamento dos canais em uma mina ao longo dos anos, uma vez que, devido ao plano de lavra, os cenários futuros podem ser facilmente construídos.

A maioria das simulações utiliza tamanho, posição e características de composição dos objetos, como permissividade relativa e condutividade; localização das bases transmissoras e receptoras; características da antena e frequência de operação. Além disso, o modelo 3D leva em conta a análise de *beamwidth*. Como resultados, as simulações podem gerar dados como: fator de transmissão, frequência Doppler ( $f_D$ ), atraso, ângulos de elevação e azimute para a direção de partida e de chegada. Além disso, para simular mais fielmente ambientes dinâmicos,

é possível adicionar velocidade aos objetos ou realizar troca de posições (YUN e ISKANDER, 2015).

As simulações geralmente apresentam resultados condizentes com a realidade, desde que realizada com os parâmetros corretos, e o tempo de simulação e requisitos de memória podem ser dimensionados facilmente. Além disso, fornecem informações completas sobre o canal, em termos de tempo, frequência e espaço, tornando-se uma ferramenta adequada para projetar ou testar ambientes onde ainda não se tem operação ou se tem dificuldades de acesso. Por outro lado, as simulações tem uma implementação complexa, exigem maior esforço computacional quando comparado a modelos simples de propagação de onda e a qualidade depende fortemente da qualidade de informações disponíveis. Por fim, as simulações podem até substituir medições locais com grande eficiência, mas nunca será um método sem erros, uma vez que medições são necessárias para comprovar a eficácia do modelo utilizado.

Exemplos significativos da utilização de simulações *Ray Tracing* são mostrados por Knorzner *et al.* (2007): comunicação entre trens de alta velocidade; comunicação entre base e veículos e comunicação entre veículos. Esses três experimentos mostram resultados que demonstram a compatibilidade das simulações com o comportamento dos raios no mundo real, por meio da comparação entre resultados medições e simulações.

O Traçado de Raios é uma técnica cada vez mais difundida para estimar a atenuação de um sinal ao longo de um terreno, principalmente para realizar simulações. O *Ray Tracing* é utilizado para prover uma visão geral sobre as características do canal, sendo capaz de realizar cálculos satisfatórios para grandes estruturas, com recursos computacionais razoáveis, provendo análise tanto no domínio da frequência quanto no temporal e espacial (NEEKZAD *et al.*, 2007).

Nessa técnica, um transmissor emite raios normais a sua superfície e esses raios, por sua vez, obedecem a dois princípios: o princípio de Fermat, que estabelece que um raio sempre segue o menor caminho entre a fonte e o possível receptor; e o princípio de Campo Local, que assume que raios de alta frequência produzem reflexão, refração e difração quando atingem uma superfície. Além disso, ele considera a dispersão causada por obstrução de sinais por objetos no caminho de propagação dos raios. Vários raios são gerados e a propagação de um transmissor a um receptor é definida pela contribuição de todos as trajetórias entre eles. Para garantir maior acurácia nos resultados, os modelos de *Ray Tracing* buscam utilizar as características do ambiente, as características do modelo de propagação adotado, um ponto de observação a vários comprimentos de onda do obstáculo (para se assimilar ao comportamento óptico) e, ainda, os obstáculos maiores que o comprimento de onda analisado (SARKAR *et al.*, 2003); (KNORZNER *et al.*, 2007).

Os modelos *Ray Tracing* estimam características como *path Loss*, ângulos de chegada e saídas, e atrasos. Mas ao contrário de vários outros modelos, ele não produz nenhuma fórmula para se chegar a aproximações, ele realiza as operações computacionalmente e devido ao fato de utilizar altas frequências, não depende de uma memória computacional tão grande, como seriam necessárias para outros modelos (YUN e ISKANDER, 2015). A chave de sucesso do *Ray*

*Tracing* é buscar a maneira mais rápida computacionalmente de determinar as características das atenuações de sinal (SARKAR *et al.*, 2003).

## **2.7. Motivação para Aplicações na Mineração**

A mineração, apesar de ser considerada um atividade primária comparada a outros setores do mercado, não fica pra trás no quesito tecnologia, sendo por vezes a pioneira em determinadas aplicações. A tendência é que as minas se tornem sistemas ciber-físicos móveis em larga escala, onde os mundos físico e digital interajam para alcançar objetivos com pouca intervenção humana, por meio dos robôs e sistemas automatizados utilizando sistemas de computação e armazenamento de dados. Nesse contexto, por ser uma tecnologia que vem com a ideia de conectividade virtualmente ilimitada e confiável, o 5G deve ganhar atenção também no setor mineral (GARCIA *et al.*, 2016).

Por outro lado, as minas são ambientes muito dinâmicos, com mudanças topográficas constantes, o que torna o estudo da propagação de sinais um grande desafio. Embora algumas atividades de medições tenham sido realizadas nos últimos anos (ALMEIDA *et al.*, 2017b); (ALMEIDA *et al.*, 2017a), está claro que são necessárias mais medições, principalmente, quando se pretende analisar a viabilidade dos sistemas 5G. No entanto, as campanhas de medição são dispendiosas e demoradas (RANGAN *et al.*, 2014), especialmente neste ambiente industrial, uma vez que as minas geralmente estão em locais remotos, de difícil acesso e onde a segurança, principalmente do pessoal, é uma grande preocupação, exigindo-se treinamentos específicos para qualquer pessoa que desempenhe uma atividade na área de mineração. Essas limitações dão espaço para o uso de métodos como o traçado de raios (KNORZER *et al.*, 2007). A partir daí, as simulações assumem grande papel.

As simulações podem ajudar a entender a como a propagação se dá em toda mina, até mesmo em situações mais complexas, como por exemplo, o sombreamento causado por grandes veículos, analisar demanda das redes, ajudar na melhor localização das antenas e veículos, prever o comportamento de novas tecnologias, verificar modelos e planejar o funcionamento das minas a longo prazo.

## **2.8. Condições de Visada em Minas a céu aberto**

No estado da arte, o uso de comunicação baseada em ondas milimétricas, exceto para a indústria espacial, é limitado às aplicações de consumo de curto alcance. No entanto, nessa faixa de frequências os sinais passam a se propagar de forma quase ótica, deixando um pouco de lado a contribuição por reflexões, refrações e difrações, e sendo muito dependente de condições de visada direta (LOS) (MALTSEV *et al.*, 2010). Desse modo, é plausível conceber que as ondas milimétricas podem vir a ser utilizadas em ambientes de maior alcance, desde que com condições de LOS aceitáveis.

Por avaliação visual, as condições de LOS em uma mina a céu aberto tendem ser geralmente favoráveis, como citado por (ALMEIDA *et al.*, 2017a). No entanto, estudos que comprovem esse pressuposto não foram de fato encontrados, com tal informação se tratando mais de um “senso comum” do que um resultado quantitativo. Então, antes de se pensar em aplicar um sistema de comunicação por ondas milimétricas em minas, embora simulações aqui mostradas previamente corroborem para isso, é necessário analisar como as condições de LOS e NLOS se comportam ao longo dos anos nesses cenários. Essa análise pode ditar a viabilidade de se implantar tecnologias baseadas em ondas milimétricas, a exemplo do 5G, em ambientes de minas a céu aberto.

Após realizar uma intensa pesquisa sobre os estudos de propagação de radio-frequência em ambientes de mina, considerando as condições de visada e o espectro das ondas milimétricas, percebe-se que todos esses estudos foram feitos considerando minas subterrâneas, mas nenhum estudo ao menos cita as minas a céu aberto. A propagação em minas subterrânea, devido à grande quantidade de obstruções contidas nesses ambientes, e.g., paredes dos túneis, fiação elétrica, sistemas de ventilação e reservatórios de água, tende a se importar muito menos com as condições de visada, tendo que utilizar outros métodos para que essa comunicação aconteça sem fio. Desse modo, a comunicação por ondas milimétricas torna-se praticamente inviável em minas subterrâneas. Por outro lado, em minas de superfície as condições de visada direta são a melhor forma de se realizar a comunicação, ainda mais se tratando de ondas milimétricas.

Alguns estudos de mmW em minas subterrâneas foram encontrados, mas ambos mostram um fato previamente citado: grandes perdas devido às baixas condições de visada direta. Zhou *et al.* (2015) assumem as perdas de caminho para a frequência de 60 GHz e propõe métodos para mitigá-las. Já Ghaddar *et al.* (2017), utilizam a mesma frequência e mostram perdas superiores a 20 dB para ambiente de mina subterrânea, levando em conta apenas a obstrução causada por trabalhadores.

Não só as ondas milimétricas, mas todos os sistemas que operam em frequência maior que 6 GHz requerem visada direta desobstruídas para uma operação adequada, diferentemente das frequências sub 6 GHz, onde os fenômenos de difração e reflexão contribuem em muito para a propagação (MALILA *et al.*, 2015). Desse modo, é necessário entender as condições do LOS em uma mina a céu aberto para mostrar se as ondas milimétricas poderiam ser um meio de propagação de RF nesses ambientes.

Mais uma vez, a localização e operação das minas dificultam a análise das condições de LOS e NLOS nas minas, desse modo, recorre-se novamente às simulações para auxiliar nesses estudos. Nas simulações, pretende-se realizar a análise numérica para verificar como as condições de visada direta se comportam ao longo dos anos, dando indícios se as ondas milimétricas têm futuro nesses ambientes, em caso de aumento das condições de visada direta, ou não, caso contrário.

### 3. Metodologia Proposta

Nesta seção, explica-se como se deu a execução das simulações para se garantir resultados aceitáveis para o comportamento dos canais de rádio nas minas a céu aberto. A simulação deve entregar resultados confiáveis, ter baixo custo de implementação (em comparação com testes *in loco*) e produzir resultados com uma velocidade superior à implantação de um sistema de medições.

Todas as simulações foram realizadas com o software Wireless Insite, por meio de modelos de terreno e/ou plantas concedidas pela Vale. O Instituto Tecnológico Vale possui a licença desse software e também possui unidades de processamento gráficos (GPUs, do inglês *Graphics Processing Units*) que aceleram a execução das simulações, produzindo resultados mais rápidos, mas que mesmo assim, dependendo da precisão e da área analisada, demandam dias.

A partir das saídas do software, podem ser realizadas análises sobre os canais existentes nas minas da Vale e podem também ser sugeridas alterações para que um melhor desempenho das redes seja alcançado, seja em conjuntos existentes ou em novas redes a se implementar nos próximos anos.

#### 3.1. Wireless Insite

Existem vários softwares que fazem simulação de propagação de sinais no mercado. Um deles é o Wireless InSite. Ele permite alocar características específicas de cada sistema, garantindo a predição de propagação de ondas eletromagnéticas em um canal de comunicação, sendo capaz de realizar simulações com alto grau de precisão. Por meio do Insite é possível fazer o planejamento de ondas milimétricas em ambientes externos (*outdoor*), análise de ondas milimétricas em ambientes internos (*indoor*), performance de dispositivos wi-fi e simulações *Beamforming* (REMCOM, 2017a).

O Wireless Insite possui várias opções para importar arquivos que contenham o perfil dos terrenos ou das construções estudadas, como os formatos *Terrain Elevation Data* (DTED), *Drawing Exchange Format* (DXF) e *United States Geological Survey* (USGS). O relevo, construções e demais objetos podem ser gerados também dentro do próprio programa. Além disso, os mais variados tipos de materiais e antenas estão disponíveis na base de dados do software (DAVIS, 2009).

O Wireless Insite permite que várias características dos materiais utilizados nas simulações sejam alterados. A seguir, mostram-se quais as modificações possíveis e o que elas acarretam para que sejam realizadas as melhores simulações possíveis para as minas da Vale.

Propriedades dos materiais como espessura, permissividade relativa, condutividade, coeficiente de reflexão e coeficiente de transmissão podem ser ajustadas de acordo com cada aplicação. Além disso, é possível criar características para determinados materiais, e caso ele apresente uma alteração em apenas uma determinada região, é possível alterar-se as carac-

terísticas apenas dessa região, sem alterar as demais (DAVIS, 2009).

As posições e alturas dos transmissores e receptores podem ser especificadas pelo usuário ou definidas com base em um banco de dados do próprio software, que apresenta mais de 20 tipos diferentes de antenas (REMCOM, 2017b). Além disso, o usuário pode alterar as propriedades das antenas, como altura, energia irradiada e padrão de irradiação, no qual podem ser escolhidos 8 tipos diferentes de formas de onda para o sinal transmitido. Além disso, a frequência de operação e a largura de banda operacional podem ser alteradas de acordo com cada aplicação (DAVIS, 2009).

Quanto aos transmissores e receptores, existem diferentes tipos de conjuntos para eles, como por exemplo: ponto a ponto, rota, plano XY, arco horizontal e arco vertical. No modo ponto a ponto, a localização dos transmissores e do receptores podem ser especificadas independentemente em qualquer ponto da área analisada. No modo Rota, os elementos transmissores e receptores são uniformemente espaçados. No plano XY uma área é ocupada com os pontos transmissores ou receptores com uma distância uniforme em uma grade cartesiana, abrangendo áreas maiores do que os outros tipos de conjuntos apresentados. No arco horizontal, pontos transmissores ou receptores são colocados ao longo de um arco fixo cujo diâmetro é especificado. Já o arco vertical permite colocar receptores e transmissores acima ou abaixo do plano XY. Além disso, outros conjuntos, menos usuais, estão também disponíveis: cilindro, polígono, superfície vertical e face pontual (DAVIS, 2009).

Novos elementos, como objetos e imagens, também podem ser adicionados ao ambiente do Insite, por meio da importação de outros formatos. O software permite ao usuário criar uma área de estudo, dentro do contexto geral, em que deseja analisar a propagação. A área de estudo pode ser criada especificando sua localização e tamanho ou permitindo que o software se encaixe em todos os recursos do programa dentro da área de estudo. As propriedades da área de estudo permitem ao usuário selecionar o modelo de propagação, o espaçamento dos raios, o número de reflexões, o número de transmissões, o número de difrações e o método de propagação dos raios (REMCOM, 2017b).

Quanto aos modelos de propagação, citados no parágrafo anterior, existem nove modelos dentro do Insite. Cada um dos modelos de propagação tem suas próprias propriedades, que restringem o número máximo de reflexões, transmissões, difrações, tipos de antenas, alcance, métodos de rastreamento de raios, frequência máxima e frequência mínima. Alguns modelos seguem a abordagem de rastreamento de raios combinada com a Teoria Uniforme da Difração. Propriedades avançadas da área de estudo, como o número de reflexões antes e depois da difração, as transmissões antes e após a difração e o limite de perda de trajeto podem ser variadas de acordo com a aplicação. Já quanto ao espalhamento, o software não permite a inclusão destes fenômenos (REMCOM, 2017b). Dos modelos de propagação existentes, três deles serão explicados mais a fundo na subseção a seguir: Vertical Plane, Full 3D e X3D. Ao final das explicações, a Tabela 3.1 mostra um resumo das principais características.

Como saída para essa gama de elementos listados acima, o software fornece ao usuário



os seguintes elementos: energia recebida, perda de caminho, ganho de caminho, atraso, magnitude do campo elétrico, fase de campo elétrico, campo elétrico complexo, direção de chegada, direção de partida média, perfil de atraso de energia, espalhamento Doppler, perfis de terreno, campo elétrico vs. frequência, campo elétrico vs. tempo, resposta ao impulso, potência total recebida, direção média de partida e dados de diagnóstico. Esses dados são mostrados ao usuário e salvos em arquivos de texto (DAVIS, 2009).

### 3.1.1. Modelos de Propagação Utilizados

Nesta seção, serão apresentadas as características básicas e limites de operação para três dos modelos de propagação do Wireless Insite: Vertical Plane, Full 3D e X3D. Ambos os modelos combinam algoritmos de traçado de raios com Óptica Geométrica (GO) e a Teoria Uniforme de Difração (UTD). Os métodos de rastreamento de raio são usados para encontrar os caminhos de propagação entre transmissores e receptores. Os métodos físicos (GO e UTD) são, então, usados para avaliar os campos elétricos complexos associados a cada caminho de raio. Outro fator comum dos três modelos é o fato de aceitarem todos os tipos e alturas de antenas disponíveis no software.

Nas subseções seguintes é possível ter uma visão geral de como cada modelo funciona, além de um breve resumo das capacidades e limitações de cada um. Além disso, a Tabela 3.1 ao fim da seção, mostra as entradas relevantes, os intervalos de entrada válidos, os fatores de propagação e elementos levados em consideração para cada modelo.

### 3.1.2. Vertical Plane

O modelo *Vertical Plane* (VP ou Plano Vertical) é um modelo de propagação baseado em raios que traça todos os caminhos dentro de um plano vertical bidimensional, criando uma geometria 2D a partir da interseção da geometria 3D com um plano vertical. Destina-se principalmente para prever a propagação em terrenos irregulares em VHF (Frequência Muito Alta, do inglês *Very High Frequency*) e UHF (Frequência Ultra Alta, do inglês *Ultra High Frequency*). O Plano Vertical mantém informações sobre todos os caminhos de propagação e utiliza exatamente o padrão de antena especificado na para transmissores e receptores.

Para um raio de propagação com duas ou menos interações, o método de imagem é utilizado e, quando existem mais de duas interações, o método utilizado é o *Shooting and Bouncing Ray* (SBR ou Método de Tiros e Saltos).

O método SBR é empregado para traçar os caminhos dos raios através da geometria tridimensional do obstáculo. No caso do VP apenas o terreno é considerado obstáculo, uma vez que não considera objetos. Os raios são traçados a partir dos pontos de origem, sendo refletidos nos obstáculos e rastreados até o número máximo de reflexões ou até o limite da área de estudo. No caso do VP, o número máximo de reflexões é 30.

Todavia, existe um fenômeno, denominado bordas de difração, que pode dar origem a um forte caminho de propagação, mesmo em regiões sem visada direta. De acordo com a Teoria Geométrica da Difração, as difrações ocorrem nos pontos em que o campo se torna descontínuo. As bordas de difração geram raios adjacentes que seguem caminhos diferentes através da geometria, podendo, então, desviar esses raios para regiões sem visada direta. Quanto mais difrações forem habilitada, mais bordas serão geradas e maior a chance de se atingir regiões sem visada direta.

A partir daí, constrói-se um caminho específico para cada ponto de campo a partir do transmissor ou borda de difração. Como o SBR lança raios em ângulos discretos, é improvável que qualquer raio passe exatamente por um ponto de campo. Para compensar o espaçamento entre raios, uma esfera de coleta é construída em torno do ponto de campo. Os raios que passam por essa superfície são usados para construir os caminhos de raio específicos para o ponto de campo.

Embora o método SBR permita várias reflexões e transmissões em um caminho de raio, o tempo de cálculo pode se tornar grande quando ambos os reflexos e transmissão são solicitados. O tempo de computação ( $t_C$ ) é definido como:

$$t_C \approx \frac{(N_R + N_T + 1)!}{N_R!N_T!}, \quad (3.1)$$

em que  $N_R$  é o número de reflexões e  $N_T$  o número de transmissões. Se nenhuma difração for solicitada, o tempo de computação será aproximadamente proporcional ao número de faces ( $N_F$ ) na geometria (faces duplicadas valem pro duas). Para uma difração, o tempo de computação é aproximadamente proporcional a ( $N_F^2$ ).

Para os casos de espaço livre, os resultados do modelo VP são ideais, com apenas a radiação da antena padrão e distância impactando os resultados. Para casos com solo ou água, o Plano Vertical aplica as propriedades do material através dos coeficientes de reflexão onde os caminhos dos raios interagem com uma superfície.

### 3.1.3. Full 3D

O modelo Full 3D propaga raios através da geometria do projeto e inclui os efeitos de reflexões, transmissões e difrações para determinar a intensidade do campo elétrico gerado. O modelo permite objetos e não coloca nenhuma restrição na forma dos mesmos. O Full 3D também inclui transmissão através de superfícies, permitindo modelar a propagação em ambientes internos.

Existem dois métodos de propagação no modelo Full 3D: o método SBR, já explicado para o Método VP, e o Método Eigenray.

Para o SBR Full 3D, o número combinado de reflexões e transmissões não pode exceder 30. Se o número combinado de reflexões e transmissões for maior que 30, cada valor é reduzido

proporcionalmente para que eles somem 30. Para que a transmissão ocorra normalmente, todos os objetos devem ser incluídos como faces duplas, ou seja, o raio pode interagir com qualquer lado do objeto, tanto do lado externo como do interno.

Já o método Eigenray envolve uma construção explícita dos caminhos dos raios entre transmissores e receptores que satisfazem o Princípio de Fermat, explicado na Seção 2.5. Como o método SBR, ele encontra até 30 transmissões por caminho de raio. No entanto, esse método tem as seguintes restrições: (i) permite um máximo combinado de três reflexões e difrações por caminho de raio; (ii) não considera caminhos que difratam, refletem e depois difratam novamente; e (iii) só considera três difrações consecutivas se forem em arestas paralelas.

O tempo de computação com o método Eigenray é aproximadamente proporcional a  $N_F$ . Como o tempo de computação não aumenta significativamente com o número de transmissões, o método Eigenray geralmente é uma boa escolha para aplicações que requerem um grande número de transmissões, desde que as restrições sobre o número de reflexões e difrações sejam aceitáveis.

#### 3.1.4. X3D

O modelo de raio X3D foi desenvolvido para fornecer um modelo de propagação 3D completo, altamente preciso, capaz de rodar em unidades de processamento gráfico (GPU) e usar *multi-threading* para aproveitar os processadores *multi-core*. Esse modelo usa algoritmos de caminho exato e de profundidade. Os principais benefícios do modelo X3D é o aumento de velocidade alcançada pela aceleração de GPU e *multithreading*, e a precisão alcançada através dos cálculos de caminho exato.

O X3D também utiliza o método SBR, mas com algumas diferenças. As difrações não são identificadas procurando diferenças de direção entre raios adjacentes de reflexões similares. Em vez disso, quando uma reflexão ocorre perto o suficiente de uma borda, um conjunto discreto de pontos ao longo dessa borda é considerado. O caminho refletido da face e os caminhos difratados dos pontos da borda são então rastreados.

Depois de encontrar os caminhos dos raios pelo SBR, o X3D implementa um algoritmo chamado de cálculo de caminho exato (EPC ou *Exact Path Calculator*). No SBR, os caminhos dos raios interceptam os alvos receptores dentro de uma tolerância definida por uma esfera, já o EPC ajusta os pontos de interação (reflexões, difrações e transmissões) para que o caminho atinja exatamente o centro receptor. O EPC também garante que todos os ângulos de difração e reflexão são válidos e que o caminho corrigido não é bloqueado por nenhuma face intermediária.

Além disso, o modelo oferece os seguintes recursos que outros modelos não suportam: capacidade de simulação MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas, do inglês *multiple-input and multiple-output*); geração de caminhos adjacentes; aceleração para conjuntos de receptores densos (APG do inglês *Adjacent Path Generation*); absorção atmosférica; e cálculos de dispersão difusa (*diffuse scattering*), entre outras, que não serão utilizadas no presente trabalho.

Tabela 3.1: Principais Características dos Modelos

Modelo de Propagação	Vertical Plane	Full 3D	X3D
Máx. Reflexões	30	$\leq 30$	30
Máx. Transmissões	Apenas Folhagem	$\leq 30$	8
Máx. Difrações	6	3	3
Objetos	Nenhum	Todos	Todos
Tamanho	$\leq 100$ km	$\leq 10$ km	$\leq 10$ km
Algoritmo	SBR	SBR ou Eigen Ray	SBR e Correção Exata do Caminho
Frequência	100 MHz — 20 GHz	100 MHz — 20 GHz	100 MHz — 100 GHz
Domínio de Propagação	Vertical 2D	3D	3D

## 3.2. Procedimentos

Nesta seção é apresentado como foram realizadas as simulações, que são o principal objeto deste trabalho. As simulações foram divididas em alguns casos mais importantes, que foram: a calibração do método *Vertical Plane* (VP), para uma mina a céu aberto; e a influência do sombreamento causado por grandes maquinários. As características de cada um dos cenários, bem como o porquê da utilização dessas características são mostradas nas subseções seguintes. Já os resultados dessas simulações, são mostrado e analisados no capítulo seguinte.

### 3.2.1. Validação Comparativa utilizando o Método *Vertical Plane*

Como o principal objetivo do trabalho é analisar a propagação de sinais em minas a céu aberto, foi realizada uma simulação para a Mina de Brucutu. Medições da intensidade de sinal recebido ao longo da minas e também da atenuação de sinal (*path loss*) foram realizadas na mina por uma parceria de estudos do autor do presente trabalho. Os dados não foram divulgados, ainda, em nenhum trabalho, então, decidiu-se realizar simulações nas mesmas características, para poder se comparar com os resultados obtidos *in loco*.

Um arquivo “ASCII” com o terreno da mina à época das medições foi disponibilizado pela mineradora. Devido à compatibilidade do software, foi necessário uma conversão de “ASCII” para “GeoTiff”, via Matlab (Apêndice A). Após a conversão, realizou-se um recorte no terreno utilizando o software gratuito QGIS. Esse recorte serviu para delimitar apenas a área da lavra, uma vez que o arquivo disponibilizado pela mineradora continha também os arredores da mina, mas que não interessam para o estudo em questão e apenas aumentava o tamanho do terreno e, conseqüentemente, o tempo de execução do projeto. O terreno utilizado pode ser visualizado na Figura 3.1. As propriedades do terreno foram definidas uniformemente sobre a

área: terra seca, com permissividade relativa  $\epsilon=4$  e condutividade  $S = 0,00186$  S/m, que são os valores setados pelo software e retraram os valores médios para terrenos secos.

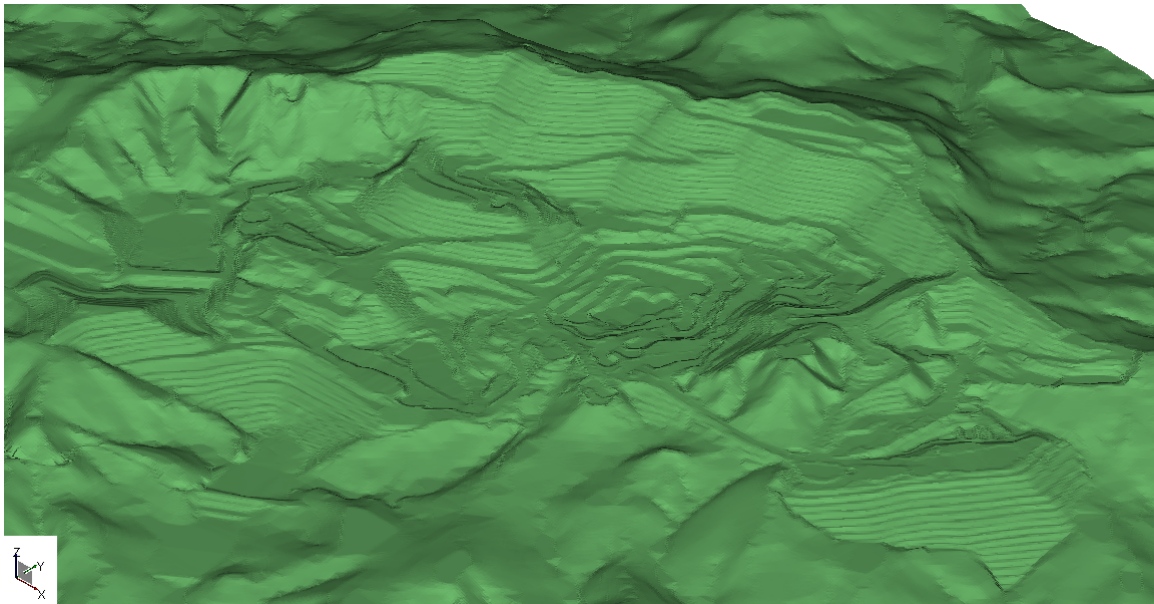


Figura 3.1: Vista do Terreno Utilizado da Mina de Brucutu

Após definir o terreno, foram adicionados, então, os transmissores e receptores, de acordo com as características do experimento prático, respeitando inclusive as coordenadas geográficas das antenas no momento de coleta dos dados. Foi utilizado uma torre transmissora de 5 metros de altura, do tipo Dipolo Linear (*Linear Dipole*). Foram analisadas ondas senoidais em duas frequências distintas,  $795\text{MHz}$  e  $2577\text{MHz}$ , ambas com  $0,01\text{MHz}$  de largura de banda. As potências utilizadas foram  $18,70$  dBm e  $50,10$  dBm para a menor e maior frequência, respectivamente. Embora o foco principal do trabalho sejam as ondas milimétricas, esse primeiro estudo foi realizado para verificar a confiabilidade do software e apenas dados referentes à essas frequências encontravam-se disponíveis.

Já para os receptores, foram utilizadas antenas do tipo *Short Monopole* (polo encurtado), a  $1,8$  m de altura. Na prática, os sinais foram coletados por meio de uma antena instalada em uma caminhonete, a essa mesma altura, que percorreu uma rota pré-determinada de  $10$  km dentro da mina, coletando ao todo informações sobre pontos ao longo da mina. Em cada ponto, a caminhonete parava por alguns minutos e coletava informações sobre Potência de Sinal e *path loss*. Eram realizadas várias medidas e feita, então, a média dessas características. Foram repassadas nos arquivos disponibilizados, as coordenadas geográficas e os parâmetros de intensidade de sinal e *Path Loss* para  $995$  pontos à  $2577$  MHz e  $988$  pontos à  $795$  MHz.

Determinou-se uma área de estudo na região da mina, para observar a propagação de sinal no ambiente de mina. Como saída, foram estabelecido os caminhos de propagação (*Propagation Paths*), que demonstram o caminho percorrido dos transmissores até cada receptor; a potência recebida por cada transmissor; e o *path loss*, que representa a obstrução do caminho.

Duas possibilidade de propagação seriam apropriadas para analisar os resultados de

simulação: modelo X3D e Vertical Plane (VP), já descritos anteriormente nas subseções 3.2.2 e 3.2.4. Todavia, o modelo X3D, quando considerado em um terreno com várias obstruções de visada direta, necessita de que a difração do solo seja habilitada. Como a precisão do modelo utilizado na geração do solo era alta, comparada com o tamanho do terreno, habilitar a difração do solo significaria ampliar em muito o tempo de simulação. Nesse caso, para três difrações, o programa chegou a rodar mais de 300 horas até acusar erro de falta de memória. Sendo assim, optou-se por analisar apenas com o modelo *Vertical Plane*, que, apesar da menor complexidade, é capaz de prever a propagação sobre terrenos irregulares. Os parâmetros de reflexão e difração foram setados no máximo permitido para o modelo, 30 e 6, respectivamente.

Foram, então, simuladas as condições da mina para os transmissores nas duas frequências. Os resultados e sua análise podem ser observados em forma de mapa de calor e também de forma gráfica, bem como a comparação com os dados medidos em campo, no capítulo a seguir.

### **3.2.2. Análise de sombreamento causado por maquinário**

No ambiente das minas a céu aberto, as condições de visada direta são em sua maioria favoráveis, tendo apenas alguns pontos sem visada direta. No entanto, o trânsito constante de equipamentos de grande porte pode obstruir as conexões sem fio, podendo danificar a operação de equipamentos controlados remotamente, especialmente quando conectados às carretinhas móveis (COWS), que são espalhadas pela mina e funcionam como replicadoras de sinal da antena principal.

A partir de conversas com a Equipe de Engenheiros da Mina Autônoma de Brucutu, foram levantados três cenários de maior preocupação com o sombreamento causado por grandes maquinários móveis: a obstrução causada pelos caminhões fora de estrada quando estão em movimento (carregados de minério ou vazios), o que pode gerar sombreamento em outros caminhões; e quando estão depositando material nas pilhas, uma vez que a caçamba pode causar sombreamento no receptor do próprio caminhão, como também em outros veículos. O terceiro cenário é o sombreamento causado por outro grande equipamento, que são as carregadeiras, utilizadas para carregar os caminhões fora de estrada. O sombreamento de cada um desses três cenários foi analisado e os resultados estão apresentados no próximo capítulo.

Como o intuito desta parte do trabalho é apenas analisar a influência dos equipamentos, não é necessário carregar o terreno da mina, como na seção anterior. Sendo assim, foi utilizado um terreno plano de  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ , o que na prática significa uma grande redução no tempo de cálculo em detrimento da geometria do terreno. Foi utilizado o mesmo tipo de terreno (terreno seco) com  $\epsilon = 4$  e  $S = 0,00186\text{ S/m}$ .

Ainda de acordo com a conversa da Equipe da Mina Autônoma, foi repassado que as carretinhas são alocadas no ambiente com alturas características, de acordo com o tamanho do suporte da antena, sendo utilizadas nas carretinhas no cenário de mineração as alturas ( $h_{tx}$ ) de 5, 10 e 20 metros. Nesta etapa, foram utilizadas os mesmos tipos de antenas da seção anterior:

dipolos lineares. Foram setadas ondas senoidais de 36,0 dBm.

Foram escolhidos três valores diferentes de frequências para serem analisadas: 795 MHz, que representa as frequências sub-gigahertz; 2577 MHz, como representante das frequências tradicionais utilizadas em transmissões por rádio frequência; e 28 GHz, como representante próximo às ondas milimétricas e por ser uma sendo amplamente utilizada em implementações 5G. Todas as três frequências contaram com 10 MHz de banda.

Para realizar a análise quantitativa e qualitativa da propagação dos sinais, foram definidos *grids* verticais para descrever o comportamento do sinal ao longo do terreno. Para representar o sinal recebido pelos caminhões, foram definidos *grids* horizontais exatamente na altura das antenas que são acopladas nos caminhões. Assim, foram posicionados receptores omnidirecionais, a 7,1 m de altura, para representarem as antenas dos caminhões. Essas antenas, no ambiente real, são posicionadas na parte frontal do veículo, ligeiramente acima da canopla. Nesses estudos, a reflexão e difração ocasionada pelo caminhão receptor não foi considerada, apenas foi analisado o sombreamento causado pelo caminhão obstrutor, posicionado entre as antenas e os receptores.

Na simulação, utilizou-se o modelo de propagação X3D. O número máximo de reflexões e difrações definidas foram 6 e 3, respectivamente, para otimizar o tempo de cálculo. Para essa análise, a métrica essenciais foi o *Excess Path Loss* ( $\Delta PL$ ), que leva em consideração todas as variáveis do sistema análise, como terreno, obstáculos e as características atmosféricas, possibilitando uma análise mais fidedigna. O  $\Delta PL$  é definido como a diferença entre a perda de caminho (*Path Loss*) medido e a perda de caminho de espaço livre (FSPL — *Free Space Path Loss*) (RODRIGUEZ *et al.*, 2016), representado pela seguinte equação:

$$\Delta PL = PL_{medido} - FSPL [dB]. \quad (3.2)$$

As simulações utilizaram três modelos CAD diferentes para os caminhões, representando diferentes configurações: cheio, vazio e com caçamba levantada. O modelo dos caminhões em si foi o mesmo. Foram utilizados caminhões CAT modelo 793F, que é o modelo utilizado na Mina Autônoma da Vale.

Os modelos CAD foram obtidos por meio de um banco de dados CAD gratuito, desenvolvido pela *startup* americana GrabCAD. Os itens estavam em formato SLDPRT, típico do software de modelagem de sólidos Solid Works, porém não reconhecido pelo Wireless Insite. Foi necessário, então, utilizando o Solid Works, realizar uma conversão para STL. Apesar de ser lido pelo Wireless Insite, o formato STL tem algumas limitações quanto à geometria. Sendo assim, foi necessário a conversão para o formato Collada, utilizando um site gratuito de conversão de arquivos *mesh*.

Além disso, foram feitas algumas alterações no arquivo original, que demonstra um caminhão vazio. Foi adicionado uma carga no caminhão, para representar uma pilha de minério, e em outra configuração a caçamba foi levantada de acordo com a angulação máxima prevista

no manual do modelo do caminhão Caterpillar (2012).

Como a ferramenta online possui um tamanho máximo de arquivos, foi necessário simplificar o modelo, de forma que não interferisse na qualidade da propagação de sinais. Os arquivos STL foram, então, previamente simplificados, passando de uma média de 780k faces para 140k, para serem convertidos em arquivo do tipo Collada (.dae). Os modelos dos caminhões utilizados, já dentro da plataforma de simulação, são mostrados na Figura 3.2. Todo o material dos caminhões foi definido como sendo metal, que para o software, trata-se de um condutor elétrico perfeito, possuindo ótimas características de reflexão e não deixando raios atravessarem o mesmo.

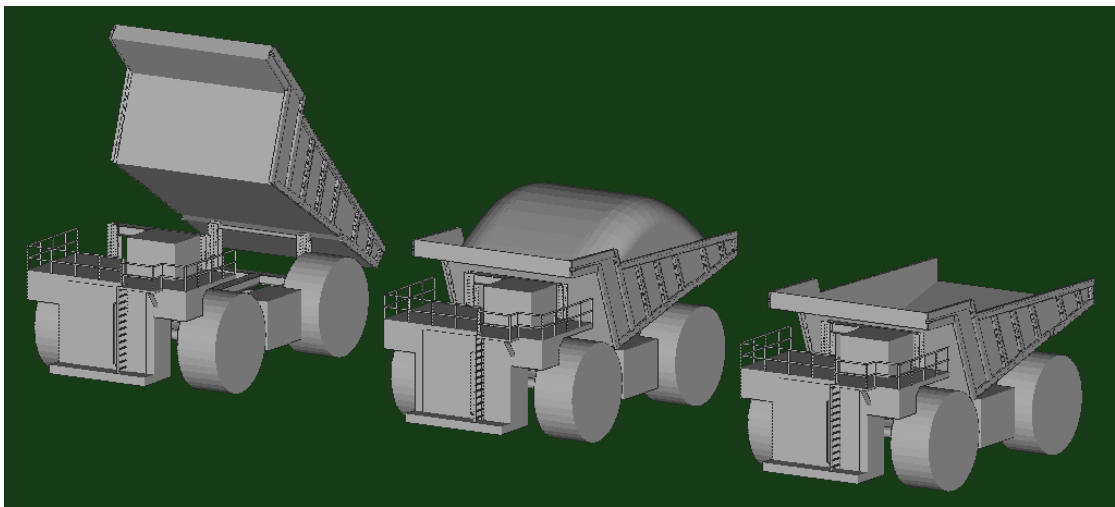


Figura 3.2: Modelos utilizados: Caçamba Levantada, Cheio e Vazio, respectivamente.

Tendo os objetos, terrenos, transmissores e receptores setados, foram realizadas as simulações dos cenários.

### **3.3. Análise Temporal de Visada Direta em um Mina a Céu Aberto**

Nesta parte do trabalho, tem-se por objetivo principal analisar a porcentagem de visada direta, entre um transmissor base e vários receptores espalhados em um ambiente de mina a céu aberto. Para isso, algumas características foram consideradas para representar o ambiente com menor número de objetos possíveis, evitando-se qualquer outro fenômeno, para se analisar apenas LOS e NLOS. Logo, foi utilizada apenas uma antena omnidirecional, e não um array de antenas como certamente seria utilizado em um ambiente real de propagação com ondas milimétricas.

O terreno utilizado nos experimentos foi da Mina de Brucutu, uma das minas da Vale. Inaugurada em 2006, ela contém apenas uma cava principal e cobre uma área de 4 km de comprimento por 2,3 km de largura. O estudo utiliza informações cedidas pela empresa do terreno



em cinco diferentes anos: 2012, 2014, 2015, 2016 e 2017. Na Figura 3.3, mostra-se a vista aérea da área atualmente. Por meio das informações disponíveis desses cinco anos, é possível gerar os terrenos e fazer as simulações para esses cenários para verificar o comportamento das ondas.



Figura 3.3: Vista Aérea da Mina de Brucutu - Abril 2019.

A potência de transmissão foi ajustada com um LOS de 54 dBm. Esse valor é claramente muito alto, mas isso tem uma explicação: em um sistema de ondas milimétricas reais, a potência transmitida varia basicamente entre 1 e 4 watts, mas essa baixa potência é compensada com um ganho muito alto fornecido por um conjunto de antenas. Então, em um cenário real, não ter-se-ia apenas uma antena passando o sinal, mas várias antenas ao longo da mina. No entanto a intenção principal não é realmente montar a rede, mas analisar como os feixes se comportariam em um ambiente de mina, por isso foi utilizada uma antena isotrópica de 40 metros de altura. Uma antena isotrópica irradia sinais em todas as direções com a mesma intensidade, logo, para esse tipo de análise, apenas computacional, comporta-se muito bem. A posição da antena foi colocada no ponto exato onde está a antena principal na mina real, para ilustrar melhor a propagação do sinal.

Como o sinal é irradiado tanto na vertical como na horizontal, para alterar o ganho é apenas necessário dimensionar os valores de potência recebidos ou, trabalhando em dB, fazer uma soma, considerando o ganho dos feixes em uma direção específica. Nas simulações realizadas o valor de ganho da transmissão para a recepção foi de apenas 5 dBi. Os receptores foram colocados em toda a área correspondente à cava, totalizando 7623 pontos de Rx, espaçados em 20 metros cada um e com 7,0 metros de altura cada.

Se o trabalho estivesse sendo voltado para ondas de baixa frequência ou se fosse no cenário real, uma antena com um ganho muito grande não seria viável, mas aqui a intenção é ter um EIRP alto o suficiente para que seja possível analisar a propagação dos raios. Além disso, neste cenário representado, não há preocupação com a interferência que essa antena causará no meio, sendo de interesse, única e exclusivamente, a cobertura. Portanto, a utilização de uma antena com alta potência se torna válida. As simulações foram então realizadas assumindo-se que o EIRP é de 54 dBm. Com essa potência, foi possível analisar a cobertura alcançada na mina e qual a porcentagem de visada direta alcançada.

Fazendo-se uma comparação entre o experimento exposto aqui (uma antena com alto ganho) e o mundo óptico, seria como se em uma matriz de múltiplas antenas, houvesse um raio específico de luz, que ilumina apenas uma certa região, e qualquer coisa fora do feixe não seria iluminada. Por outro lado, a configuração adotada com alta potência seria como um sol, emanando luz em todas as direções. Na prática, essa alta potência seria impraticável, mas como o interesse aqui é simular um ambiente com a comutação ideal de vários feixes, é como se tivéssemos uma matriz de antenas com comutação perfeita. Algo praticamente impossível de se construir, mas que pode dar uma boa noção do comportamento do sinal no cenário analisado.

As simulações foram executadas em dois momentos. Inicialmente analisou-se a linha de visada direta visual, na qual o resultado reflete exatamente se existe alguma obstrução (terreno, objeto) entre o transmissor e o receptor. Para isso, foi utilizado o modelo de Free-Space Path Loss, em que automaticamente são gerados valores de fundo de escala para situações sem condição de visada direta.

Já no segundo momento, a simulação era para se analisar, de modo mais parecido com a realidade, o comportamento das ondas na mina. Foram, então, realizadas simulações utilizando o modelo de propagação X3D, um modelo de traçado de raios capaz de rodar em uma unidade de processamento gráfico (GPU) e usar multi-threading para aproveitar os processadores multi-core, o que significa simulações em alta velocidade. Esse modelo inclui reflexões, transmissões e difrações, incluindo reflexos do terreno. A precisão é obtida através de cálculos exatos de trajetória e contabilizando a absorção atmosférica. A absorção atmosférica é de extrema importância em cenários de mmW, onde a absorção O<sub>2</sub> pode causar uma atenuação de até 15 dB/km (COMMISSION *et al.*, 1997). Nos cenários estudados, a absorção atmosférica foi setada em 1 atm, com 22,5°C e 50% de umidade relativa do ar. O número máximo de reflexões e difrações foram definidos 4 e 1, respectivamente, para otimizar o tempo de cálculo.

## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos de caso que ajudaram na compreensão do problema e no manuseio das informações para que o objetivo principal do trabalho, análise para ondas milimétricas e sistemas 5G, fosse cumprido. Ao fim do capítulo, são mostrados os resultados que ratificam o objetivo proposto.

Além dos estudos aqui apresentados, outro estudo ajudou bastante no primeiro contato e entendimento da ferramenta Wireless Insite. Todavia, por se tratar mais de um estudo de funcionamento da ferramenta, na forma de um relatório técnico, optou-se por apresentá-lo a parte, no Apêndice B.

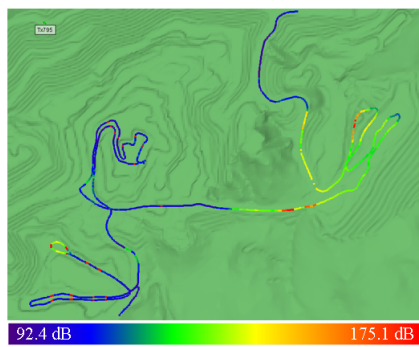
### 4.1. Validação Comparativa utilizando o Método *Vertical Plane*

Para alguns pontos da validação comparativa VP, tanto para Potência de Sinal Recebido como para *Path Loss*, a simulação apresentou valores de fundo de escala: -250 dBm e 250 dB, respectivamente. Além disso, como os aparelhos utilizados apresentam uma limitação de medição, foram desconsiderados os pontos abaixo de -120 dBm de potência de sinal recebido e acima de 160 dB para *Path Loss*. Para 795 MHz, essa restrição retirou 4,86% (*Path Loss*) e 6,28% (Potência de Sinal Recebido) dos 988 pontos. Já para 2577 MHz, essa restrição retirou, respectivamente, 6,73% e 4,72% dos 995 pontos.

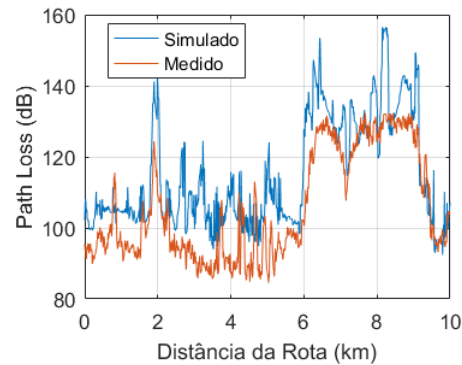
As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os resultados para 795 MHz e 2577 MHz, respectivamente. É possível notar graficamente que as curvas de valores simulados e medidos seguem a mesma tendência, com alguns picos fora da curva. Com o intuito de comparar os resultados, foi utilizado, então, o RMSE, já explicado anteriormente. Para 795 MHz, o RMSE foi 12,24 dB para o *Path Loss* e 9,51 dB para Potência de Sinal Recebido.

Nesse caso, também é possível notar uma relação entre os valores simulados e medidos. Para 795 MHz, o RMSE foi 11,55 dB para o *Path Loss* e 17,06 dB para Potência de Sinal Recebido.

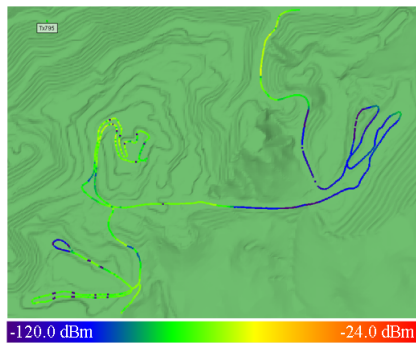
Os resultados mostram que a previsão do traçado de raios segue a perda de trajetória medida, mas os valores são ligeiramente subestimados. A razão para esta diferença é a suposição simplista da caracterização dos materiais: um local de mineração real tem diferentes tipos de materiais expostos ao longo do terreno, não sendo possível simular cada micro região específica com suas características reais de permissividade e condutividade. Além disso, um ambiente de mineração conta com vários maquinários em constante movimento, que por serem compostos em sua maioria por metal, podem influenciar nas características de reflexão e difração. Essa influência do máquina é parte dos estudos seguintes.



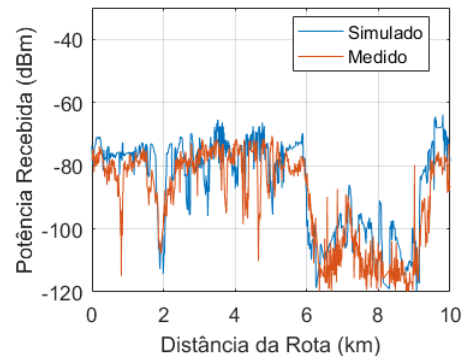
(a) Simulação *Path Loss*



(b) *Path Loss* Simulado  $\times$  Medido



(c) Simulação Potência de Sinal Recebido



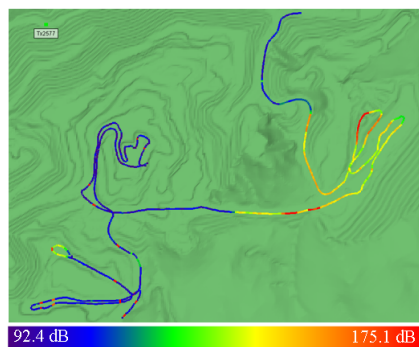
(d) Potência de Sinal Simulada  $\times$  Medida

Figura 4.1: Resultados para a rota de receptores utilizando 795 MHz

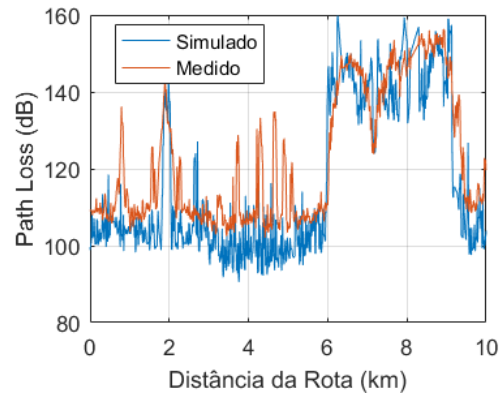
## 4.2. Análise de sombreamento causado por maquinário

O sombreamento ocasionado por objetos na linha de visão direta causado por grandes máquinas é senso comum, principalmente no cenário de mineração. Mas nenhum estudo qualitativo e nem quantitativo dessa obstrução (exceto o estudo publicado pelo próprio autor deste trabalho de Oliveira Gomes *et al.* (2018)) é encontrado na literatura, mesmo este ambiente sendo de extrema relevância num futuro próximo, devido ao aumento de atividades autônomas e teleoperadas. Vale ressaltar que esses estudos são ainda mais importantes em ambientes de Minas como os existentes em Minas Gerais, que são em regiões de morros que podem causar bastante sombreamento. Em países como Austrália, em que a mineração é bem desenvolvida, essa análise não é tão importante pois a mineração lá se dá por camadas, em ambientes mais planos. Como motivação da análise, foi simulado um cenário com um caminhão vazio entre transmissores e receptores, para analisar o sombreamento. O cenário motivador considera a antena a 50 metros do caminhão, com altura ( $h_{tx}$ ) de 5, 10 e 20 metros e a frequência de 28 GHz.

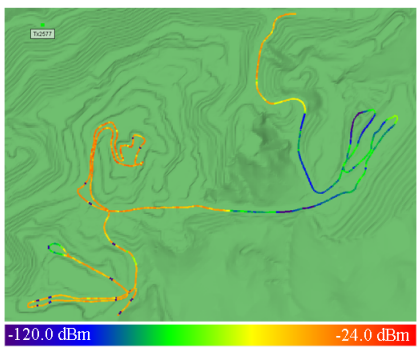
O comportamento do sinal foi avaliado qualitativamente a partir de um grid de receptores em um plano vertical que corta o caminhão, como pode ser visto nos mapas de calor da Figura 4.3, que mostra o *Excess Path Loss* para as alturas e frequência simuladas.



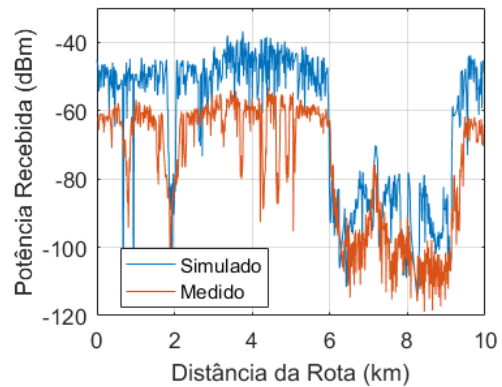
(a) Simulação *Path Loss*



(b) *Path Loss* Simulado  $\times$  Medido



(c) Simulação Potência de Sinal Recebido



(d) Potência de Sinal Simulada  $\times$  Medida

Figura 4.2: Resultados para a rota de receptores utilizando 2577 MHz

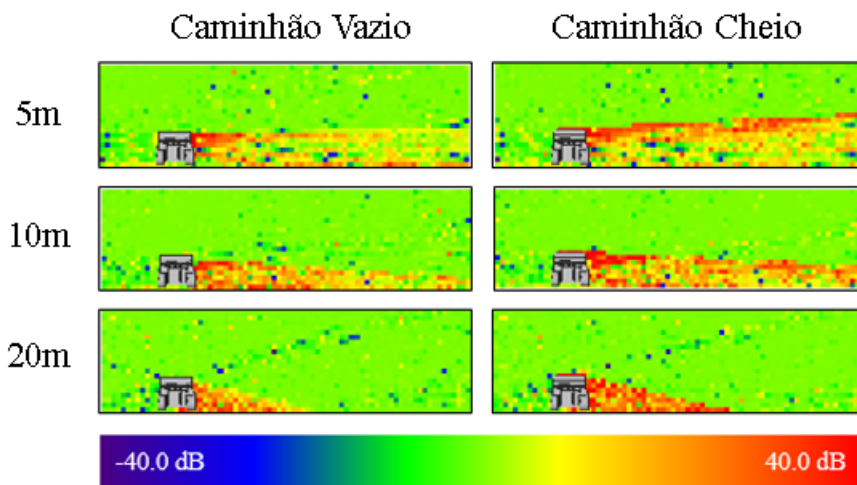


Figura 4.3: *Excess Path Loss* para 28 GHz, em função da distância, altura do transmissor e configuração do caminhão.

Da Figura 4.3, é possível notar que dependendo da altura do Tx ( $h_{tx}$ ), o *Excess Path Loss* pode afetar uma área maior. Por exemplo, no primeiro caso, com  $h_{tx} = 5$  m, valores de sombra de até 40 dB são observados após o caminhão. Para  $h_{tx} = 20$  m, por outro lado, o efeito do *Excess Path Loss* está contido nas proximidades do caminhão.

Com base nessa motivação e nas conversas com a Equipe de Engenheiros da Mina Autônoma de Brucutu, foram investigados outros cenários e propostas algumas melhorias para minimizar o sombreamento do V2I, conforme pode ser visto nas seções posteriores.

#### 4.2.1. Sombreamento Caminhão-Caminhão

Este cenário avalia a obstrução de sinal causada por um caminhão entre a carretinha (transmissor) e um outro caminhão (receptor). Assim, um caminhão foi posicionado a 50 metros de uma antena e um *grid* horizontal a  $h_{tx} = 7,1$  m (altura média de onde as antenas são instaladas nos caminhões) foi posicionado 10 metros após o caminhão, para representar o segundo caminhão (receptor) que sofre sombreamento do primeiro. A visão espacial do cenário pode ser visto na Figura 4.4.

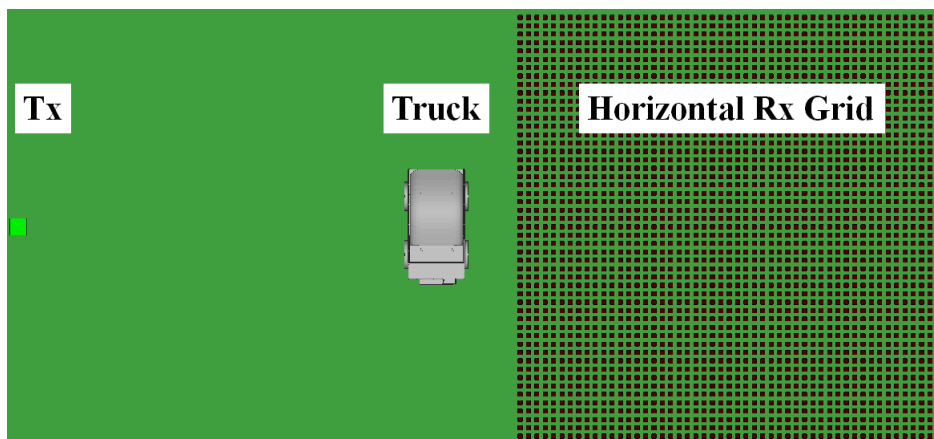


Figura 4.4: Vista Superior dos Elementos do Cenário Caminhão-Caminhão

A partir daí foram então realizadas as simulações, para duas situações pertinentes desse cenário: Caminhão Cheio e Vazio. A Figura 4.5 mostra o resultado visual para o *Excess Path Loss* no *grid* horizontal que representa o segundo caminhão, nas duas configurações simuladas: Vazio (Figura 4.5a) e Cheio (Figura 4.5b). Em ambas as figuras, pode-se ver alguns arcos de cor azul, que nada mais são do que interferências construtivas de sinal, causadas pela interferência do sinal emitido pela antena e sinal refletidos na cabine do modelo de caminhão representando. Essa verificação pode ser feita analisando separadamente cada um dos raios emanados da antena.

Os resultados mostram que *Excess Path Loss* para o caminhão cheio é maior do que para o vazio. Para todas as frequências, o caso  $h_{tx} = 5$  m é o mais crítico, como visto na Figura 4.6, que apresenta a função de distribuição acumulativa (CDF) do *Excess Path Loss* nesses casos, para  $h_{tx} = 10$  m e  $h_{tx} = 5$  m, para as duas configurações. Para  $h_{tx} = 10$  m, as condições do

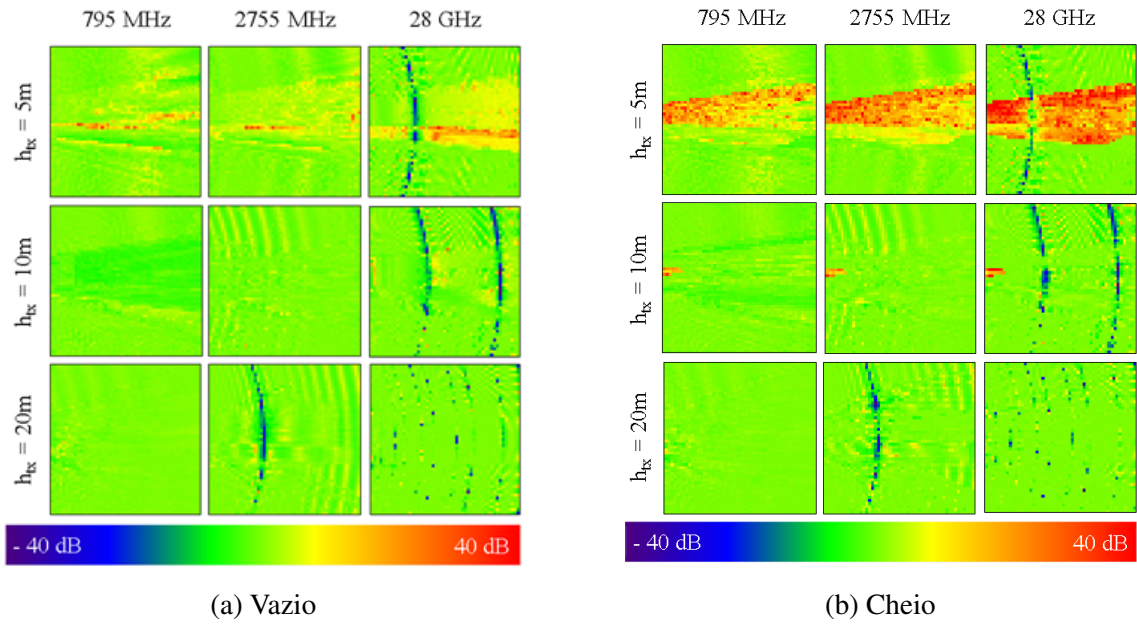


Figura 4.5: *Excess Path Loss* causado pelo Caminhão Obstrutor

caminhão, ou seja, vazias ou cheias, não afetam significativamente as curvas para um nível de confiança de 90%. O mesmo não é válido para o caso com  $h_{tx} = 5$  m, em que para 90% de confiança a de 28 GHz, por exemplo, o *Excess Path Loss* vai de 8 dB para quase 30 dB.

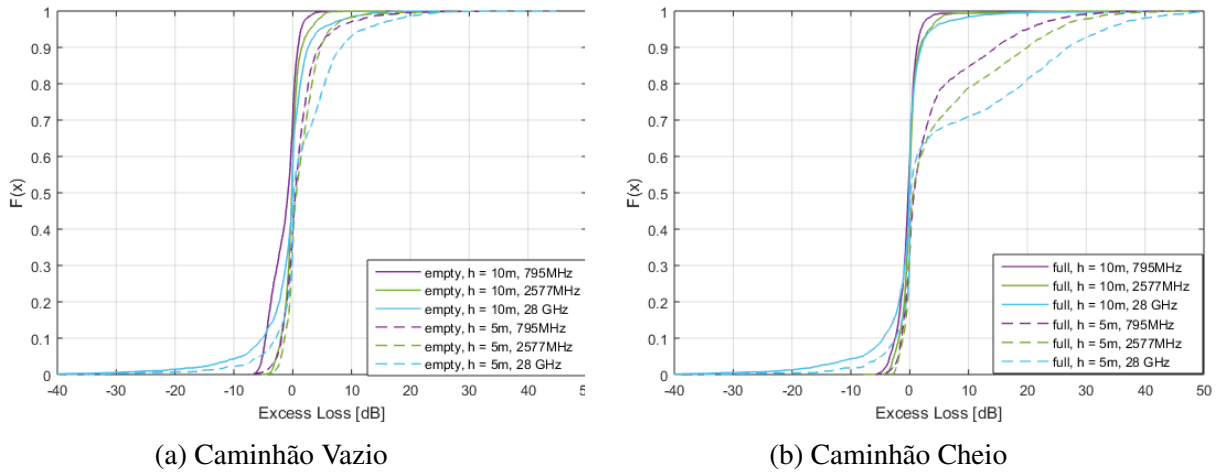


Figura 4.6: Função de distribuição acumulativa do *Excess Path Loss* para antenas de 5 e 10 m a 795 MHz, 2577 MHz e 28 GHz.

A partir das CDFs é possível investigar as margens para garantir um determinado valor de probabilidade de sombreamento V2I no cenário proposto. Considerando o parâmetro usual para ambientes de RF (95% de confiabilidade), tem-se o *Excess Path Loss* mostrado na Tabela 4.1. Como o uso de teleoperação e veículos autônomos está aumentando muito nas minas e por ser um cenário crítico, evitando ao máximo falhas, é necessário atingir uma confiabilidade maior, de 99% por exemplo. Para esses cenários de missão crítica, os resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Cenário Caminhão-Caminhão: *Excess Path Loss* (em dB) para 95% de confiabilidade (Análise Tradicional)

Freq.	795 MHz		2577 MHz		28 GHz	
Altura	Vazio (dB)	Cheio (dB)	Vazio (dB)	Cheio (dB)	Vazio (dB)	Cheio (dB)
5 m	7,0	20,0	6,2	24,7	11,9	32,7
10 m	1,3	1,8	2,8	3,1	4,3	3,3
20 m	1,0	1,1	3,2	3,3	1,9	1,8

Tabela 4.2: Cenário Caminhão-Caminhão: *Excess Path Loss* (em dB) para 99% de confiabilidade (Missão Crítica)

Freq.	795 MHz		2577 MHz		28 GHz	
Altura	Vazio (dB)	Cheio (dB)	Vazio (dB)	Cheio (dB)	Vazio (dB)	Cheio (dB)
5 m	16,0	28,6	11,8	34,1	21,2	43,7
10 m	3,1	3,9	5,2	5,9	11,6	12,5
20 m	2,1	2,3	5,9	6,8	6,4	5,8

A partir dos resultados apresentados nas simulações, é possível notar que a altura do transmissor é significativa para a propagação do sinal. Por exemplo, se uma aplicação precisar de 95% de confiabilidade a 795 MHz, a perda prevista por *Excess Path Loss* deve ser maior que 28 dB, o que é extremamente desafiador. Considerando o cenários analisado, para as duas configurações de caminhão, é possível recomendar uma altura mínima de 10 metros para os transmissores em um ambiente de mineração, para evitar problemas significativos com o sombreamento, com um pequeno *Excess Path Loss*. Entretanto, parâmetros como localização da carretinha (para não transformá-la em uma macrocélula) e também comportamento das interferências devem ser analisadas antes de realizar essa recomendação de altura para todos os projetos.

#### 4.2.2. Caçamba Erguida

Este cenário analisa a obstrução do fora de estrada ao levantar a caçamba, por exemplo, quando o caminhão está depositando o material no britador. Neste caso, o caminhão é tanto o obstrutor de sinal quanto pode ser também o receptor. Mudou-se, então, a maneira de analisar o impacto do sombreamento para este cenário. Foi definido um grupo de transmissores ao redor do caminhão para quantificar o sinal recebido e analisar o sombreamento causado pela caçamba.

Considerando o levantamento da caçamba, ela mesma pode se tornar uma obstrutora de sinal para o próprio caminhão, caso o transmissor esteja atrás do caminhão. De modo a simular esse fenômeno, foram posicionados 07 transmissores, em posições diferentes, na parte que corresponde a um quarto de circunferência na parte traseira do caminhão. Foi considerado apenas um quarto de circunferência, pois para o outro quarto o fenômeno seria espelhado, e para a semi circunferência a frente do caminhão, de nada importaria pois os transmissores não teriam obstrução de sinal. Assim como nos exemplos anteriores, foi mantida a distância de 50



metros entre transmissor e caminhão. Os transmissores foram espaçados em  $15^\circ$ , de acordo com a Figura 4.7. Conforme pode ser visto na representação, escolheu-se o lado direito do caminhão para realizar a análise. Isso deve-se à presença da cabine, que representa o pior caso de sombreamento.

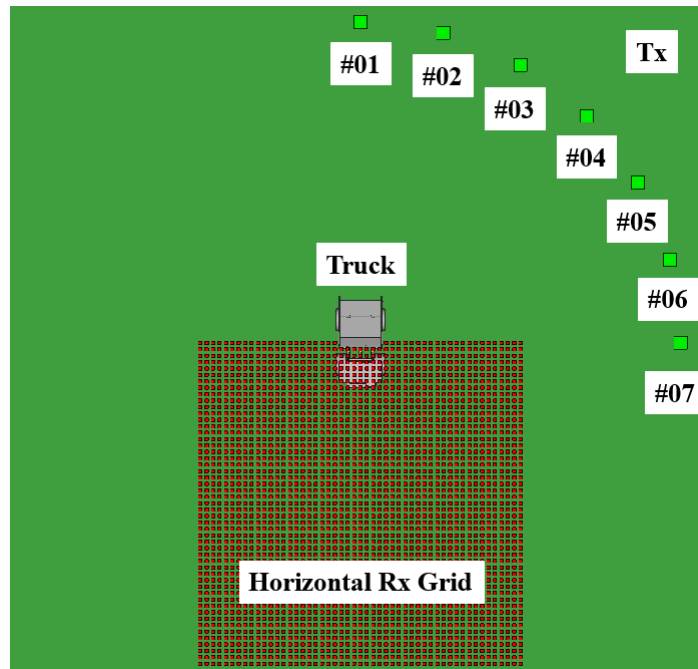


Figura 4.7: Vista Superior dos Elementos do Cenário Caçamba Erguida

Para quantificar o sombreamento causado pela caçamba levantada, foi adicionado um *grid* de receptores de  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  em frente ao caminhão, para poder quantificar o autossombreamento e também outros veículos atingidos pela obstrução. Esses elementos também podem ser visto na Figura 4.7.

Foram então analisados os efeitos do sombreamento para 02 alturas de transmissor ( $h_{tx} = 10\text{ m}$  e  $h_{tx} = 20\text{ m}$ ) e 03 frequências já citadas por meio de simulação. A visualização qualitativa do sombreamento pode ser vista nas Figuras 4.8 e 4.9. Como feito nos outros cenários, a Tabela 4.3 representa o parâmetro usual para RF (95% de confiabilidade) e a Tabela 4.4 considera uma missão crítica (99% de confiabilidade).

A partir dos resultados é possível perceber que evitar o autossombreamento é fundamental para a operação da rede no ambiente de mineração. É necessário evitar a situação em que a carretinha fica diretamente atrás do caminhão, onde ocorre sombreamento total em determinadas parte, inclusive na antena no caminhão. Nesse caso, o menor *Excess Path Loss* é de 22,7 dB para confiabilidade de 95 %. O melhor conjunto nesse cenário é o uso de 795 MHz com  $h_{tx} = 20\text{ m}$ . Nesse caso, um *Excess Path Loss* máximo de 7 dB (para 95%) ou 13 dB (para 99%) será encontrado se considerarmos que a antena nunca estará atrás do caminhão.

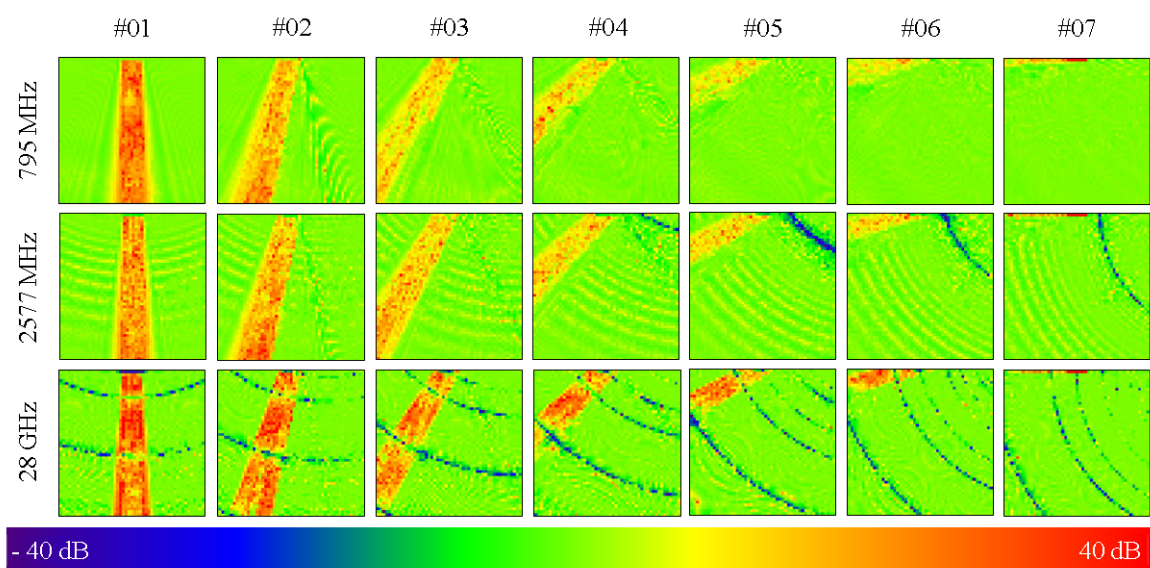


Figura 4.8: *Excess Path Loss* no cenário de Caçamba Erguida com  $h_{tx} = 10$  m

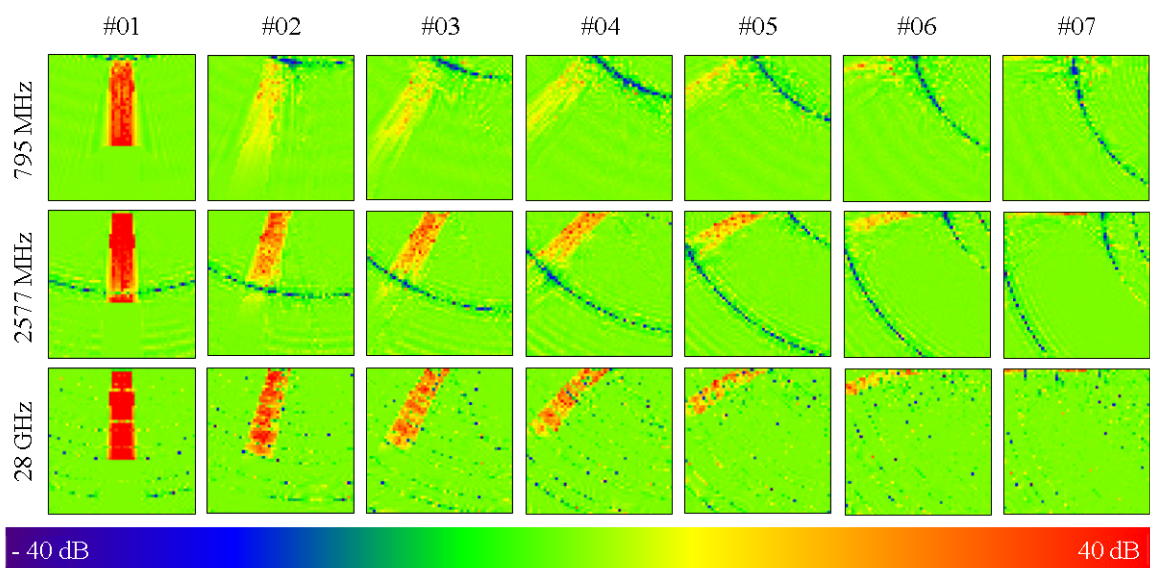


Figura 4.9: *Excess Path Loss* no cenário de Caçamba Erguida com  $h_{tx} = 20$  m

Tabela 4.3: Cenário Caçamba Erguida - *Excess Path Loss* (em dB) para 95% de confiabilidade - Análise Tradicional

$h_{tx}$	Freq MHz	Posição do Transmissor						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
10m	795	25,9	19,0	13,3	10,9	6,4	4,1	1,3
	2577	22,7	21,1	16,7	11,9	8,2	6,0	3,6
	28000	28,1	26,7	21,7	17,4	12,7	7,2	1,5
20m	795	28,4	6,7	6,0	5,5	3,9	3,3	3,1
	2577	39,3	15,1	12,3	10,4	6,3	4,2	2,4
	28000	49,2	21,7	17,9	14,1	7,1	3,7	1,5

Tabela 4.4: Cenário Caçamba Erguida - *Excess Path Loss* (em dB) para 99% de confiabilidade - Missão Crítica

$h_{tx}$	Freq MHz	Posição do Transmissor						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
10m	795	34,2	26,4	20,8	19,5	13,2	11,7	10,7
	2577	30,4	30,3	24,3	19,3	16,9	14,5	10,5
	28000	38,5	36,6	30,3	28,3	24,9	23,5	9,5
20m	795	45,2	12,4	12,1	10,7	11,0	9,4	8,8
	2577	52,8	27,5	25,8	21,2	18,8	13,4	9,4
	28000	65,3	35,5	28,2	27,3	21,9	16,5	9,5

### 4.3. Análise Temporal de Visada Direta em um Mina a Céu Aberto

A fim de identificar o comportamento das condições de Visada Direta ao longo do tempo de vida da mina, o primeiro passo foi simular a evolução das condições de visada estritamente direta, ou seja, pontos onde não existem obstáculos entre transmissor e receptor. Foram executadas cinco simulações variando os terrenos de 2012 a 2017, sendo possível identificar tanto visualmente quanto numericamente a variação do parâmetro ao longo dos anos. O modelo de Free-Space Path Loss já mostra automaticamente os pontos nos quais não se tem visada, uma vez que ele considera o valor de potência recebida como sendo fundo de escala (-250 dBm). A evolução do sinal recebido pode ser visto na Figura 4.10.

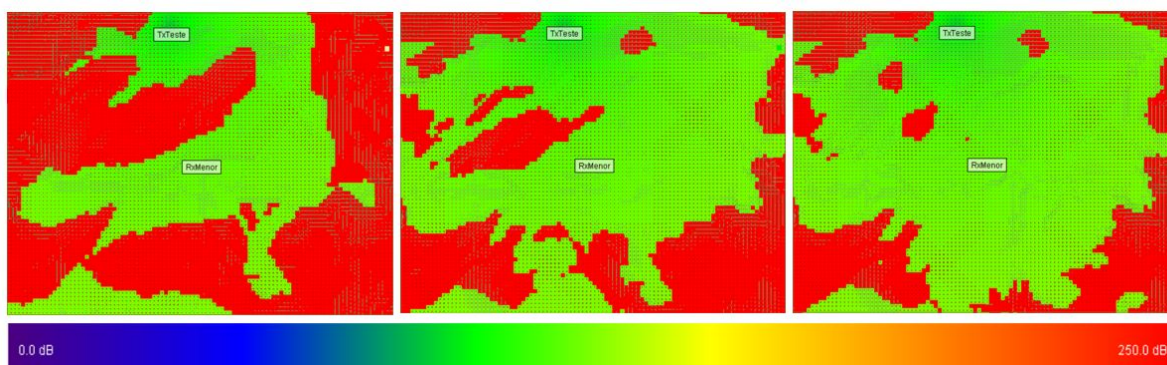


Figura 4.10: Evolução do LOS na Mina de Brucutu, nos anos de 2012, 2015 e 2017, da esquerda para a direita, respectivamente

Por meio da Figura 4.10 pode-se observar como o número de ponto sem visada direta vai diminuindo, o que é refletido pela diminuição da área vermelha nas imagens. Para se ter uma análise ainda melhor, utilizou-se uma segunda antena. Se com uma antena, já nota-se um aumento na área de cobertura, a tendência, com duas antenas é que a área sem a Visada Direta torne-se ainda menor.

Tendo isso em vista, utilizou-se um segundo ponto de transmissão, que é previsto numa

possível expansão da mina, para ser o ponto do Transmissor Tx02. As mesmas características do Tx01 foram utilizadas no segundo ponto, mudando-se apenas as coordenadas geográficas.

O Wireless Insite não permite para o modelo de Free Space Path Loss realizar a análise MIMO, sendo possível apenas plotar o mapa de calor para um dos transmissores. Todavia, mesmo com a análise visual, é necessário mostrar, em números, como as condições de LOS diferem ao longo dos anos. Sendo assim, filtrou-se os dados obtidos para verificar quantitativamente quais representavam condições de VLOS e quais representavam regiões de NLOS.

Para o tratamento desses dados, utilizou-se a seguinte lógica matemática:

$$\forall(x,y) \text{ boolean } VLOS(x,y) = VLOS\{Tx1(x,y)\} \text{ or } VLOS\{Tx2(x,y)\}$$

Essa expressão nada mais é que a representação do fato de que para um ponto ter visada direta, basta ele ter visada direta para Tx01 ou para Tx02.

A partir disso, pode-se traçar um gráfico, indicando a porcentagem de visada direta ao longo dos anos, para o cenário de 01 e de 02 transmissores. Além disso, pode-se mostrar os pontos de redundância, que são os pontos nos quais tem-se visada tanto pra Tx01 quando para Tx02. No gráfico da Figura 4.11, mostra-se essa evolução, com a porcentagem de LOS ao longo dos anos analisados.

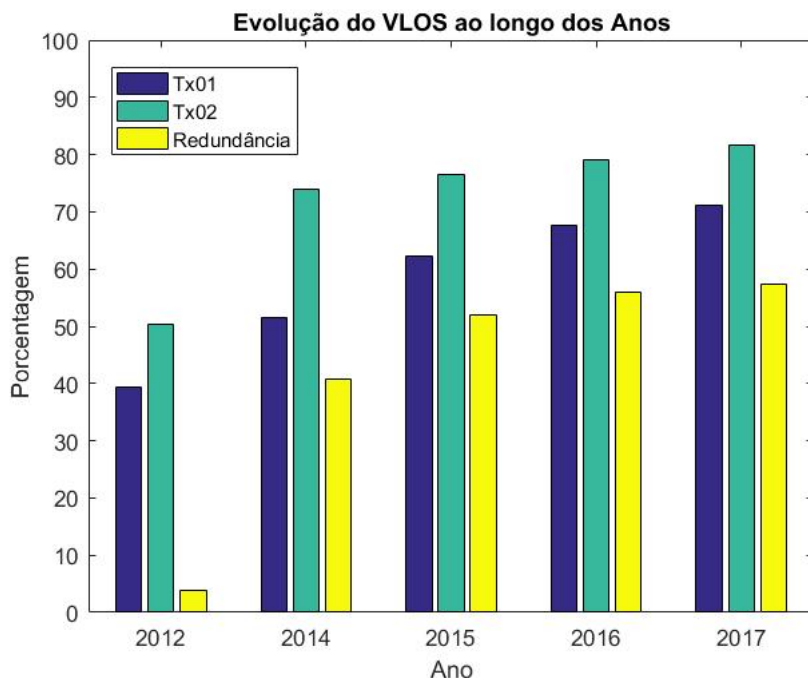


Figura 4.11: Evolução da Porcentagem LOS na Mina de Brucutu, considerando 01 e 02 Transmissores.

Os resultados mostram que o LOS é maior em 2017 do que em 2012, aumentando ano a ano. Testada a hipótese de que as condições de visada direta vão se tornando mais favoráveis

ao longo do tempo de vida da mina, é importante analisar de modo mais fiel como o sinal se propaga ao longo da mina, considerando a absorção atmosférica, as reflexões e difrações. Essa etapa, exigiu um esforço computacional bem maior, utilizando o modelo de X3D, sendo rodadas mais de 2000 horas de simulações, entre ajustes de parâmetros e testes. No modelo, as características da atmosfera foram setadas como 22,2 °C, umidade relativa de 50% e pressão atmosférica de 1 atm. Foram simulados os cenários com todos os mapas disponíveis. Nessas simulações, foi possível observar como os sinais se comportam ao longo da mina. Na Figura 4.12, mostra-se os resultados das simulações de maneira visual, considerando a Potência Recebida pelos receptores.

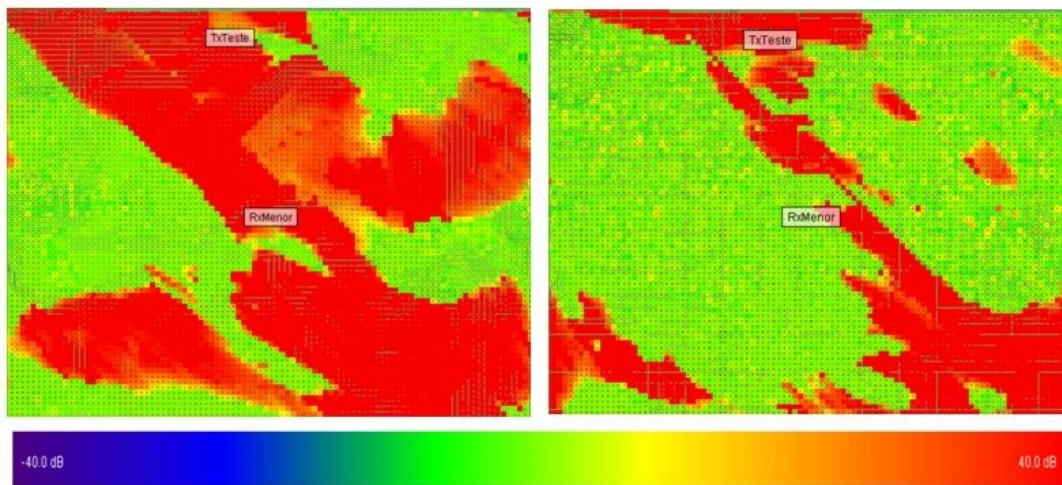


Figura 4.12: Evolução do Excess Path Loss, de 2012 para 2017, levando em conta o modelo X3D

É notório que o sinal chega a praticamente todos os locais da mina, principalmente no cenário mais atual. Apenas na região inferior direita, nota-se uma região sem sinal. Essa região, na prática, não corresponde à área da cava, correspondendo a uma área que ainda não é explorada e que na realidade corresponde a um pequeno morro, que causa obstrução do sinal para receptores que estão atrás dele.

A fim de ter uma real interpretação dos dados, de como a propagação do sinal se comportaria para um sistema de telecomunicação real, foi feito o estudo da cobertura de sinal na Mina. Na Figura 4.13, é possível ver as CDFs correspondentes ao anos de 2012 e 2017 do Excess Path Loss na mina. O Excess Path Loss representa o nível de confiabilidade do sistema, mostrando a qualidade do sinal.

A partir do CDF é possível notar que com uma torre, o cenário está longe de ser considerado ideal, pois representa uma confiabilidade de sinal muito baixa para a área analisada. Todavia, é possível notar um grande avanço de 2012 para 2017. Considerando o cenário analisado, é possível ver que a confiabilidade de sinal, sem a minimização de perdas, passa de 30% em 2012 para 55% em 2017. Esse grande aumento, deve-se fortemente ao aumento das condições de visada direta. Para chegar-se a índices de confiabilidade tradicionais, na casa de

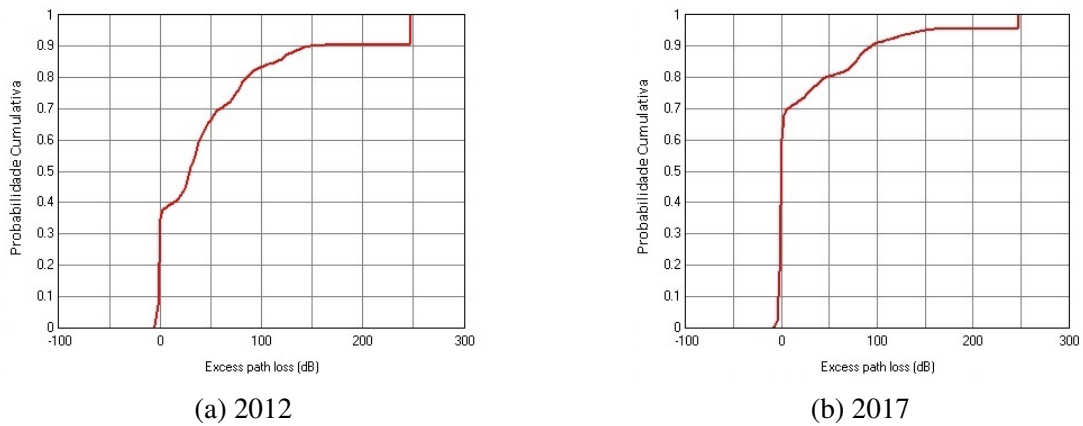


Figura 4.13: Função de distribuição acumulada do *Excess Path Loss* para 28GHz em anos distintos.

90-95%, é necessário uma grande minimização de perdas. Todavia, a implantação de novas antenas transmissoras pode ajudar a aumentar esse índice.

Além das CDF, uma outra análise ajuda a identificar como o sinal é melhor nas áreas com visada direta. O gráfico na Figura 4.14 mostra o valor de Potência Recebida para cada um dos pontos utilizados na simulação. Os pontos com VLOS e os pontos NLOS, identificados na simulação por Free Space Path Loss, são identificados utilizando símbolos diferentes. A partir disso, pode-se ver como, na maior parte dos casos, a potência recebida por um ponto sem visada direta é muito menor que a potência recebida por um ponto com visada direta. Pode ser visto uma densidade bem maior de pontos com VLOS por volta de -50 dBm. Além disso, observa-se que o quanto mais longe do transmissor, maior as chances de condições de NLOS. Como as simulações foram realizadas para 28 GHz, fica nítida a influência dos obstáculos para as ondas milimétricas.

Os resultados mostrados, tanto no experimento X3D quanto no Free Space Path Loss, indicam que o avanço das frentes de mineração contribui para melhores condições de LOS, o que significa que ele pode contribuir para a propagação de RF nas minas. Desse modo, os estudos reforçam o fato de que mmW poderia ser uma tecnologia útil em ambientes de minas a céu aberto, uma vez que a cada ano as condições de LOS aumentariam, diminuindo as interferências e obstruções de sinal.

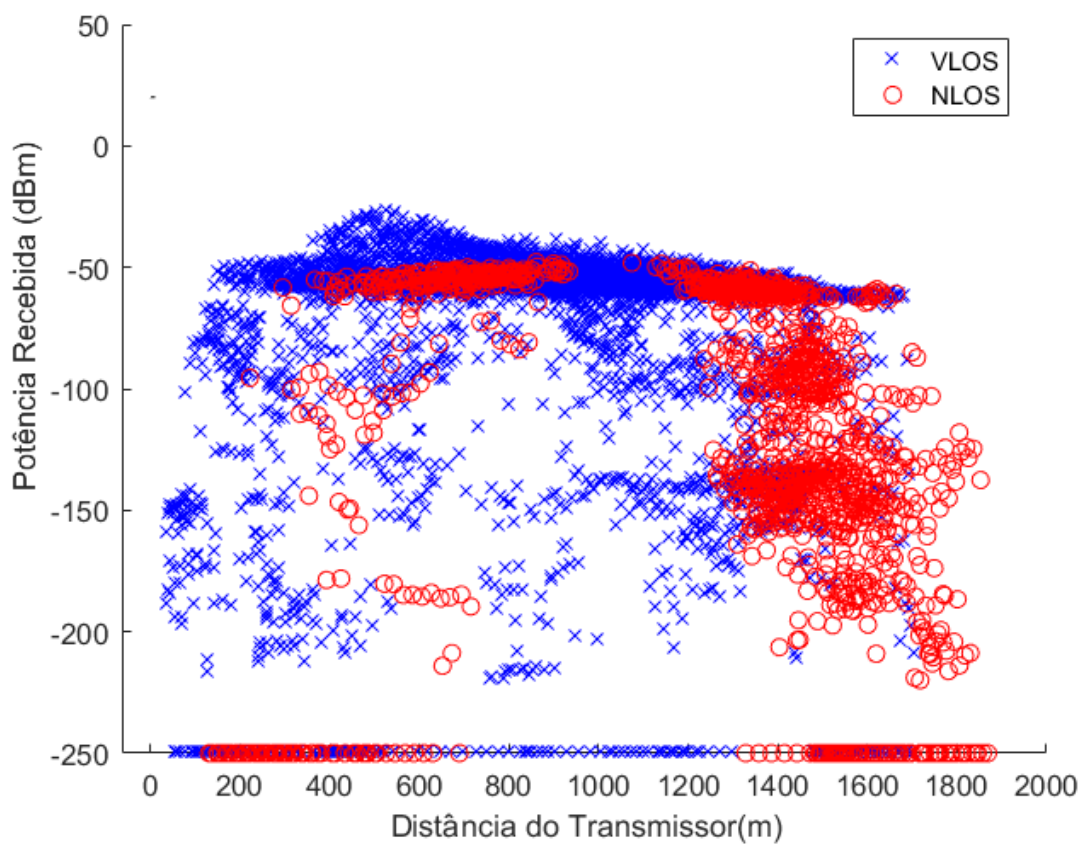


Figura 4.14: Potência Recebida para os Pontos com condição de visada direta (VLOS) e os pontos sem visada (NLOS)

## 5. Conclusão

Este trabalho mostrou a importância da análise das condições de propagação nos ambientes de mina, com as simulações ajudando a quantificar os efeitos sofridos pelas ondas no ambiente. O primeiro estudo realizado, apresentado no Apêndice B, no prédio do ITV na UFOP, serviu para familiarização com os equipamentos de medição e simulação, conhecendo as limitações de cada forma de análise.

Já as simulações em ambiente de mina, como na Seção 4.2, mostraram boa compatibilidade entre os resultados medidos em campo e os simulados. Como grande vantagem, as simulações não interferem na operação da mina, não causando nenhum tipo de prejuízo financeiro e atingindo bons resultados em um intervalo pequeno comparado à prática. Todavia, foram realizados apenas comparações dos resultados em ambientes macro, que não consideram a presença de equipamentos na mina.

Outro fator de muita relevância analisado foi o sombreamento causado pelos grandes maquinários das minas, como os caminhões fora de estrada. Os resultados demonstram claramente que o bloqueio de V2I é presente para diferentes frequências, e não só para ondas milimétricas. Esse bloqueio é ainda maior se as carretinhas e os caminhões estiverem na mesma altitude e a antena estiver a apenas 5 metros de altura. A priori, de acordo com o caso analisado, aumentar a altura da antena Tx ajudaria a diminuir o sombreamento, mas tem implicações no nível do sistema que precisam ser pesquisadas, como por exemplo, o aumento de interferência.

Passando para o ambiente de ondas milimétricas, as análises de condições de visada direta e as simulações na Mina de Brucutu para o Modelo de Propagação X3D, mostraram ainda mais que o uso de ondas milimétricas na mineração é sim uma realidade e pode ser uma opção muito viável. As simulações em X3D foram de suma importância, pois esse modelo é o único capaz de simular ondas no espectro das ondas milimétricas, que são o principal foco deste trabalho.

Por fim, foi realizado um estudo mais a fundo do avanço das condições de LOS para minas a céu aberto, utilizando como caso de Estudo a Mina de Brucutu.

A mineradora liberou mapas que mostravam o avanço da frente de lavra em 05 diferentes anos, a partir de 2012. A ideia foi realizar simulações e estabelecer métricas para todos esses ambientes, utilizando 28 GHz, uma das principais bandas candidatas para o 5G em ondas milimétricas. Foi então mostrado a evolução da cobertura ao passar dos anos e a evolução do percentual de LOS para o intervalo.

A partir dessas simulações, pode-se verificar como a evolução da frente de lavra é favorável para às condições de visada direta, com a visada aumentando à medida dos anos, fator essencial para um correto funcionamento das ondas milimétricas. Portanto, levando-se em consideração esse fator, conclui-se pela viabilidade de utilização dessa faixa de frequência para operações em minas. Logo, as ondas milimétricas podem ser sim uma grande aposta para as minas autônomas. Obviamente, estudos mais detalhados a respeito da criação de uma rede multibanda



com altíssima qualidade e capacidade ampla, levando em conta interferências e a viabilidade financeira, são requeridos, mas um grande pontapé inicial foi dado neste trabalho.

## **5.1. Trabalhos Futuros**

A partir das simulações, o melhor caminho é seguir o estudo com medidas de campo, comprovar a validade das simulações e refinar ainda mais os resultados, realizando possíveis ajustes. Ainda não se tem as medidas para comprovar a validade das simulações para o sombreamento do maquinário, que compreenderia o cenário micro da mina. O grande fator limitante dessas medidas é que, necessariamente, para fazer experimentos nas mesmas características das simulações, deveria haver uma parada na mina, para posicionar os transmissores e receptores das posições desejadas. Como já mencionado, parar a mina significa várias toneladas a menos de minério por dia, o que faz com que a companhia deixe de despachar material correspondente à alguns milhares, ou até milhões, de reais. Ou seja, como os caminhões de transporte têm um impacto direto na produtividade da mina e, portanto, na receita, colocá-los de lado para medições de RF não é simples.

Além das medições no cenário micro, seria de grande valor a realização de medidas com ondas milimétricas. Todavia, além das limitações já apresentadas no parágrafo anterior, os equipamentos para medição e geração de ondas milimétricas ainda possuem um valor muito alto no mercado, sendo inviável a compra para os primeiros estudos no ambiente de mina.

## Referências Bibliográficas

- ABDIN, M. M., JOEL, W., JOHNSON, D., et al.. “A system and technology perspective on future 5G mm-wave communication systems”. Em: *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2017 IEEE 18th*, pp. 1–6. IEEE, 2017.
- AGIWAL, M., ROY, A., SAXENA, N. “Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 18, n. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- ALMEIDA, E. P., CALDWELL, G., RODRIGUEZ, I., et al.. “Radio Propagation in Open-pit Mines: a First Look at Measurements in the 2.6 GHz Band”. Em: *28th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, (PIMRC)*, 2017a.
- ALMEIDA, E. P., CALDWELL, G., RODRIGUEZ, I., et al.. “5G in Open-Pit Mines: Considerations on Large-Scale Propagation in Sub-6 GHz Bands”. Em: *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2017 IEEE*, pp. 1–6. IEEE, 2017b.
- ANDERL, R. “Indústria 4.0-advanced engineering of smart products and smart production”. Em: *Technological Innovations in the Product Development, 19th International Seminar on High Technology, Piracicaba, Brazil*, 2014.
- BARTEVYAN, L. “Industry 4.0–Summary report”, *DLG-Expert report*, v. 5, n. 2015, pp. 1–8, 2015.
- BERTELLI, G. P. M. *Controle sobre Redes Industriais sem Fio: uma avaliação de desempenho dos padrões WirelessHART e ISA100. 11a*. Tese de Mestrado, Brasil, 2017.
- CATERPILLAR. “Caminhão Fora-de-estrada 793F”. 2012. Disponível em: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10428053>. Acessado em 05 Mar. 2018.
- COMMISSION, F. C., OTHERS. “Millimeter wave propagation: spectrum management implications”, *Bulletin*, v. 70, pp. 1–24, 1997.
- DAVIS, N. *Comparison of Ray Tracing and Measurement Results for 5GHz Band Wireless Channels*. Tese de Doutorado, Ohio University, 2009.

- DE BACKER, B., BORJESON, H., OLYSLAGER, F., et al.. “The study of wave-propagation through a windowed wall at 1.8 GHz”. Em: *Vehicular Technology Conference, 1996. Mobile Technology for the Human Race., IEEE 46th*, v. 1, pp. 165–169. IEEE, 1996.
- DE OLIVEIRA GOMES, P. H., GUIEIRO, G., DE ALMEIDA, E. P. L., et al.. “Evaluation of Shadowing Caused by Mining Machinery in V2I Communications”. Em: *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 63–67. IEEE, 2018.
- GARCIA, L. G. U., ALMEIDA, E. P., BARBOSA, V. S., et al.. “Mission-critical mobile broadband communications in open-pit mines”, *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 4, pp. 62–69, 2016.
- GHADDAR, M., NEDIL, M., TALBI, L., et al.. “Miners shadowing effects on 60 GHz transmission rate in underground mine Ricean channels”. Em: *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 156–159. IEEE, 2017.
- KNORZER, S., FUGEN, T., WIESBECK, W. “Ray-tracing for mobile communications”. Em: *Microwave Systems and Navigation: Conference on Wave Propagation in Communication*, 2007.
- LONGLEY, A. G., RICE, P. L. *Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method-1968*. Relatório técnico, INSTITUTE FOR TELECOMMUNICATION SCIENCES BOULDER CO, 1968.
- MALILA, B., FALOWO, O., VENTURA, N. “Millimeter wave small cell backhaul: An analysis of diffraction loss in NLOS links in urban canyons”. Em: *AFRICON 2015*, pp. 1–5. IEEE, 2015.
- MALTSEV, A., MASLENNIKOV, R., SEVASTYANOV, A., et al.. “Statistical channel model for 60 GHz WLAN systems in conference room environment”. Em: *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 1–5. IEEE, 2010.
- MOLISCH, A. F. “Ultrawideband propagation channels-theory, measurement, and modeling”, *IEEE transactions on vehicular technology*, v. 54, n. 5, pp. 1528–1545, 2005.
- NEEKZAD, B., SAYRAFIAN-POUR, K., PEREZ, J., et al.. “Comparison of ray tracing simulations and millimeter wave channel sounding measurements”. Em: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, pp. 1–5. IEEE, 2007.

- QUALCOMM. “5G mmWave: the next frontier in mobile broadband.” 2018. Disponível em: <https://www.qualcomm.com/invention/5g/5g-nr/mmwave>. Acessado em 15 Mai. 2018.
- RANGAN, S., RAPPAPORT, T. S., ERKIP, E. “Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges”, *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 3, pp. 366–385, 2014.
- REMCOM. “Wireless InSite Propagation Software”. 2017a. Disponível em: <https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software/>. Acessado em 27 Nov. 2017.
- REMCOM. “Version 3.1.0”, *Wireless InSite Reference Manual*, 2017b. Disponível em: Wireless Insite Versão 3.1.0.2.1.
- RODRIGUEZ, I., ALMEIDA, E. P., LAURIDSEN, M., et al.. “Measurement-based Evaluation of the Impact of Large Vehicle Shadowing on V2X Communications”. Em: *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference; Proceedings of*, pp. 1–8. VDE, 2016.
- SALES, F. L. C., NUNES, D. A. “Comparação entre sistemas MIMO e SISO para cobertura LTE em ambientes Indoor”, *SEMINÁRIO DE REDES E SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES*, v. 3, pp. 1–18, 2015.
- SARKAR, T. K., JI, Z., KIM, K., et al.. “A survey of various propagation models for mobile communication”, *IEEE Antennas and propagation Magazine*, v. 45, n. 3, pp. 51–82, 2003.
- SHAFI, M., MOLISCH, A. F., SMITH, P. J., et al.. “5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 6, pp. 1201–1221, 2017.
- VALDEZA, A. C., BRAUNERA, P., SCHAARA, A. K., et al.. “Reducing complexity with simplicity-usability methods for industry 4.0”. Em: *Proceedings 19th triennial congress of the IEA*, v. 9, p. 14, 2015.
- YANG, C.-F., WU, B.-C., KO, C.-J. “A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration”, *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, v. 46, n. 6, pp. 907–919, 1998.
- YUN, Z., ISKANDER, M. F. “Ray tracing for radio propagation modeling: principles and applications”, *IEEE Access*, v. 3, pp. 1089–1100, 2015.

ZHOU, C., PLASS, T., JACKSHA, R., et al.. “RF Propagation in Mines and Tunnels: Extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels.” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 57, n. 4, pp. 88–102, 2015.

## A. Código utilizado na conversão de ASCII (.txt) para GeoTIFF (.tif)

```
clear all
close all

% convertMap
[Z,b] = arcgridread('Brucutu.2017.txt','planar');

key.GTModelTypeGeoKey = 1; % Projected Coordinate System (PCS)
key.GTRasterTypeGeoKey = 1; % PixelIsPoint
key.ProjectedCSTypeGeoKey = 32723;
%32723; % PCS_WGS84_UTM_zone_23S from http://geotiff.maptools.org/spec/geotiff6.html

rr = maprefcells(b.XWorldLimits,b.YWorldLimits,size(Z),'ColumnsStartFrom','north');

geotiffwrite('Brucutu-2017.tif',Z,rr,'GeoKeyDirectoryTag',key);
geotiffwrite('Brucutu-2017-2.tif',Z,b,'GeoKeyDirectoryTag',key);
clear R

[brucutu, R] = geotiffread('Brucutu-2017-2.tif');

x = R.XWorldLimits(1):R.CellExtentInWorldX: R.XWorldLimits(2);
y = R.YWorldLimits(1):R.CellExtentInWorldY:R.YWorldLimits(2);
imagesc(x,y(end:-1:1), brucutu )
h = gca; % Handle to currently active axes
set(gca,'YDir','normal')
```

## B. Campanha de Medições no Prédio ITV-UFOP

O objetivo desse estudo foi ter um primeiro contato prático com a ferramenta Wireless Insite e também com os aparelhos de análise de canais (analisador de espectro, gerador de sinais e antenas), realizando um levantamento de campo (*site survey*) no prédio do ITV e gerando uma comparação com resultados simulados. A ideia era criar uma rede para o prédio de maneira que conseguisse a maior cobertura possível, com a utilização de quatro antenas.

### B.1. Conhecimento do Ambiente

O primeiro passo foi conhecer o ambiente e suas restrições, averiguar a limpeza do espectro, definir a frequência utilizada para as medições e definir os possíveis locais de instalação dos pontos de acesso. Notou-se que o espectro estava limpo para  $2577,5MHz$  e devido à configuração do prédio, optou-se por posicionar duas antenas em cada um dos dois andares do prédio.

### B.2. Simulações

Realizada a visita e determinada a frequência e a disposição básica das antenas, iniciou-se a fase de simulação. O primeiro desafio encontrado foram que as plantas disponibilizadas (em formato ".dwg") deveriam primeiramente ser convertidas para o formato ".dxf", aceito pelo software. Tentou-se realizar a conversão por algumas maneiras diferentes, mas em todas o resultado da conversão não foi satisfatório, apresentando vários erros quando aberto no software. Sendo assim, optou-se por desenhar o prédio novamente dentro do próprio software, o que demandou muito mais tempo do que o previsto devido à quantidade de detalhes (portas, vãos, paredes e andares) e, mesmo assim, não foram adicionados todos os elementos do prédio, como por exemplo bancadas, vidros das janelas e vigas de metal.

Na construção do modelo do prédio, foram utilizadas as características dos materiais da própria base de dados do software, considerando as paredes como sendo tijolos, as portas de madeira, as portas dos corredores do primeiro andar de vidro, os pisos de concreto e o teto de metal. Todas as portas foram simuladas fechadas. A Figura B.1 apresenta o prédio visto externamente. Outras figuras do interior do prédio serão apresentadas nas subseções seguintes.

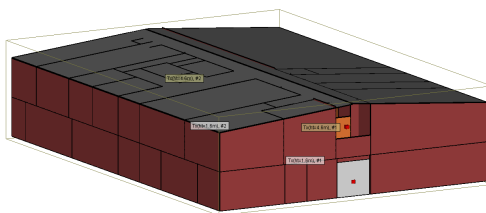


Figura B.1: Vista Externa do Prédio ITV-UFOP

As primeiras simulações foram realizadas variando as posições dos transmissores e alocando os receptores em um *grid* de 8239 elementos, espaçados no plano XY de 30 cm entre si. Foram mantidas nas simulações as alturas das antenas transmissoras ( $h_{tx} = 1,6m$ ), devido a altura da antena utilizada na prática, e a altura dos receptores ( $h_{rx} = 1,1m$ ), devido a altura do carrinho utilizado para auxiliar na campanha de medições. Os transmissores foram setados como antenas omnidirecionais de  $14dBm$  de ganho, gerando ondas senoidais com frequência de  $2577,5MHz$ . O modelo de propagação utilizado foi o Full 3D.

O modelo que, ao menos visualmente, apresentou a melhor cobertura para todo o prédio é mostrado nas Figura B.2, que apresentam as intensidades de sinal recebidas em cada andar, para cada um dos quatro transmissores existentes. Considerando a origem como sendo a extremidade inferior esquerda, a posição dos elementos pode ser vista na Tabela B.1.

Tabela B.1: Posição dos Transmissores

Transmissor	Posição X	Posição Y	Posição Z
Tx01	11,50	7,60	1,60
Tx02	11,50	22,50	1,60
Tx03	11,50	6,90	4,60
Tx04	11,50	26,00	4,60

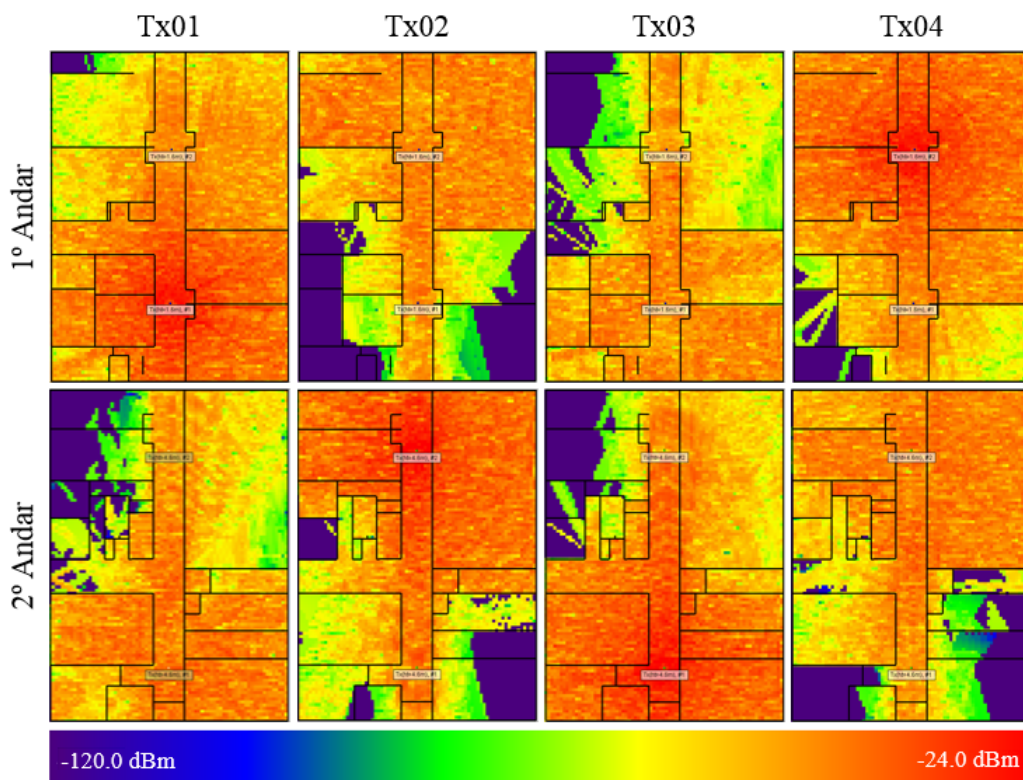


Figura B.2: Simulação da Potência de Sinal Recebido em todo o prédio de acordo com cada Transmissor

A partir das imagens, observa-se que existe um único cômodo que apresenta baixa intensidade de sinal em relação a todos os transmissores. Esse cômodo é um dos banheiros do prédio,



que não é um ponto crítico para a cobertura de sinal. Logo, tratou-se a simulação proposta como sendo a mais aconselhada. A partir dessa simulação, pode-se realizar uma simulação com menos pontos, utilizando receptores pontuais, que seriam utilizados na campanha de medições.

Foram marcados 77 pontos no primeiro andar e 58 pontos no segundo andar do prédio, buscando atender todos os tipos de propagação que poderiam ser encontrados: visada direta (LOS), sem visada direta (NLOS) e com diferentes quantidades de paredes entre os pontos.

Feita a distribuição desses pontos, foi possível conhecer a potência que chegava a cada um dos receptores, de acordo com cada um dos transmissores. As intensidades de sinal de acordo com cada transmissor no primeiro e segundo andar podem ser vistas na Figura B.3.

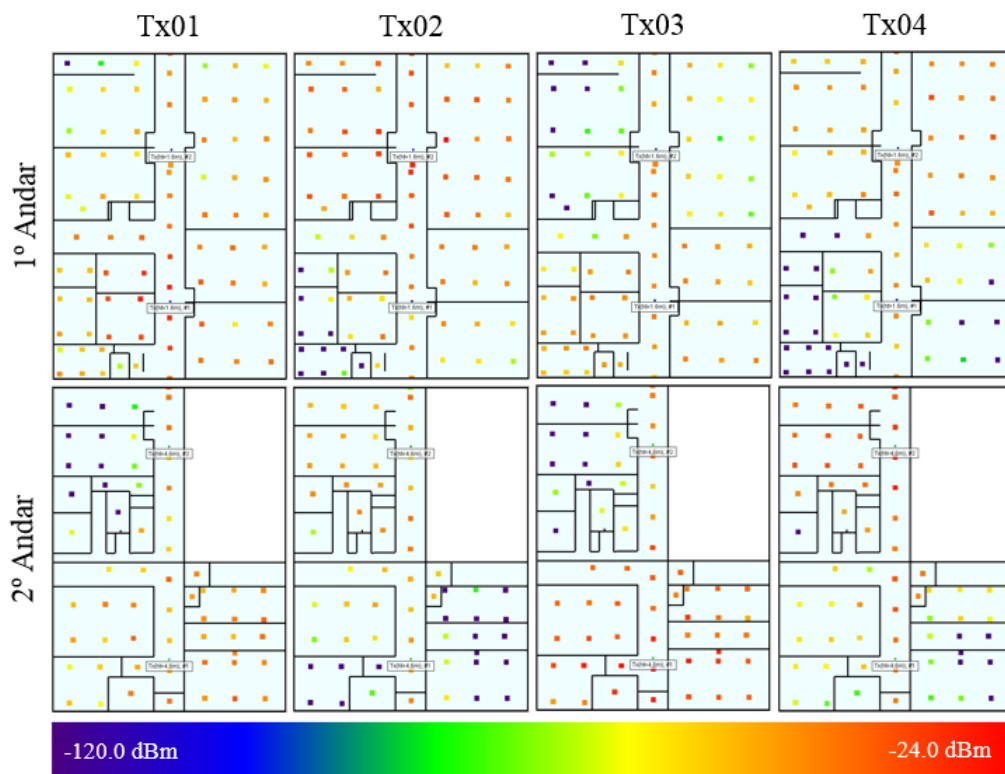


Figura B.3: Simulação da Potência de Sinal Recebido para os Receptores Marcados

### B.3. Campanha de Medições

Após as simulações, foi realizada uma campanha de medições no prédio para se comparar os resultados das simulações com os resultados práticos e avaliar a qualidade das predições. Para cada um dos pontos utilizados na simulação, foram realizadas cinco medidas, para, então, obter-se o valor médio (em dB) da potência de sinal recebida.

Na análise preliminar, verificou-se que mesmo com a antena desligada, o analisador de espectro media um valor de  $-86,7\text{dB}$ , logo, os valores abaixo desse nível foram considerado ruído. Além disso, tendo em vista que a potência do sinal recebida no ponto mais próximo ao

transmissor tinha um valor médio em torno de  $-28,7dB$ , ele foi considerado como sendo o valor de pico do sinal.

## B.4. Processamento dos Resultados

O pós-processamento das medidas foi executado no Matlab, o que garantiu uma correlação entre o que foi gerado pelas simulações e o que foi medido no ambiente real. O mesmo software foi utilizado para estimar a distribuição do erro médio quadrático entre as previsões e as medições realizadas, e realizar ajustes caso necessário.

Os dados exportados continham alguns *outliers*, como por exemplo valores de fundo de escala para a simulação e pontos que foram simulados mas que não continham medição prática, pois o sinal era muito baixo. Cada transmissor continha 135 pontos, após a retirada dos *outliers*, a quantidade de pontos foi reduzida em 14,81%, 22,96%, 25,19% e 26,67% para os transmissores TX01, Tx02, Tx03 e Tx04, respectivamente.

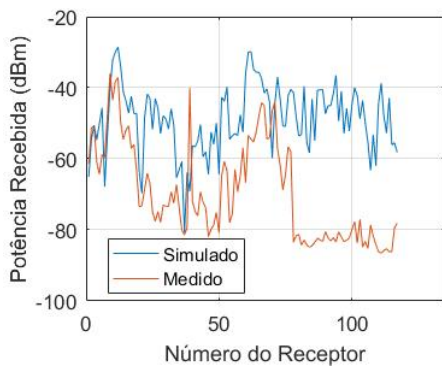
A qualidade da previsão é especialmente relevante, visto que a avaliação da simulação realizada no trabalho, comparada aos resultados obtidos em campo, pode determinar a qualidade do modelo utilizado. Na Figura B.4 é possível realizar uma primeira análise, de cunho visual, onde observa-se que há uma variação nos resultados quanto à amplitude. Entretanto, há aparente correlação quanto à variação dos valores de potência ao longo dos pontos.

Para determinar de forma quantitativa o erro, conseqüentemente a qualidade da simulação e das medições realizadas em campo, foi utilizada, então, a raiz quadrada da média quadrática do erro (RMSE ou *Root Mean Square Error*) para comparar os resultados. Comumente utilizado para comparar resultados previstos por um modelo ou simulador com os valores realmente observados, como no presente caso, o RMSE é definido por:

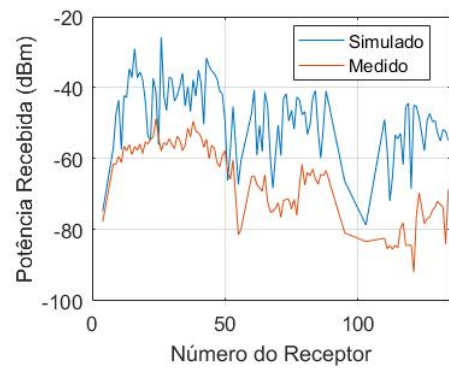
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (s_t - m_t)^2}{n}} \quad (B.1)$$

em que  $n$  é o número de amostras medidas,  $s_t$  o valor simulado e  $m_t$  o valor medido. Quando menor o valor do RMSE, melhor a confiabilidade dos dados. Em telecomunicações, valores abaixo de  $RMSE = 10dB$  são bem aceitos. Para cada um dos transmissores, de 01 a 04, os RMSE foram, respectivamente,  $23,97dBm$ ,  $20,29dBm$ ,  $19,57dBm$  e  $22,93dBm$ .

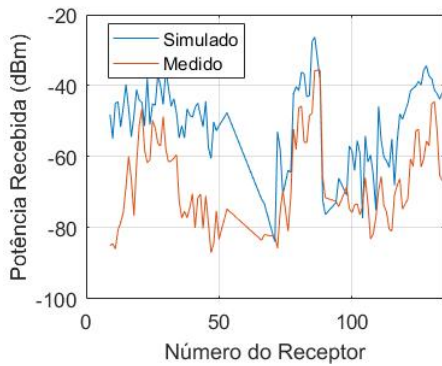
Os resultados mostram que o RMSE ficou bem superior ao aceito em telecomunicações. Todavia, todos se mantiveram entre  $19,5dBm$  e  $24dBm$ , de forma que, em uma futura reavaliação dos parâmetros do modelo, sugere-se uma correção de erro do tipo *offset* e não de dispersão; ou seja, há provavelmente um erro de viés na modelagem que gerou a simulação, o que pode facilitar sua identificação e correção.



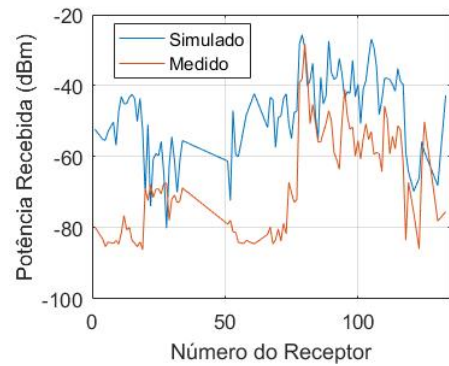
(a) Tx01



(b) Tx02



(c) Tx03



(d) Tx04

Figura B.4: Potência de Sinal Recebida Simulada e Medido por cada ponto de recepção de acordo com o transmissor

## C. Desafios Encontrados

Durante o desenvolvimento do projeto, vários desafios foram encontrados, principalmente na parte da Simulação, que parece ser simples mas exige grande esforço. O primeiro desafio foi o de encontrar referências para a utilização do software. Por ser um software com licença paga, basicamente as únicas informações disponíveis são as dos manuais de usuário e fornecidas no site do desenvolvedor. A empresa realiza alguns *workshops* online, do qual pude participar de alguns e sanar algumas dúvidas. Mas a maioria dos estudos desenvolvidos foram por tentativa e erro, até conseguir rodar as simulações com as características que necessitava.

Um dos problemas ocasionados pela falta de referência foram as importações de terrenos e objetos para dentro do ambiente de simulação. No manual do usuário, são relacionados uma série de formatos que podem ser lido pelo programa, mas a maioria deles gera problema ao carregar o arquivo no programa.

Embora o manual cite a possibilidade de importar arquivos ACSII, ao subir arquivos desse tipo para o programa, é possível visualizar o terreno mas nenhum cálculo é gerado, como se fossem importados pontos sem nenhuma conexão entre eles. Para corrigir esse problema, foi necessária a conversão, via código desenvolvido Matlab (Anexo A), que realiza a conversão de ASCII para um arquivo raster do Tipo GeoTIFF. Todavia, alguns terrenos ainda assim não carregavam para o software, devido à alta resolução ou tamanho. Sendo assim, em alguns casos foi necessário o recorte do terreno utilizando o QGIS, e gerando arquivos GeoTIFF ou DEM, que são lidos pela ferramenta.

Já para os objetos, o problema foi ainda maior. Um dos formatos compatíveis e que é possível se encontrar facilmente nos sites dos fabricantes ou em sites especializados, é o formato DXF. Todavia, o programa não aceita DXFs que contenham elipses ou elementos circulares. Desse modo, torna-se inviável a utilização da maioria dos objetos com o formato DXF. A solução utilizada para contornar esse entreposto foi gerar arquivos STL ou Collada a partir de modelos disponibilizados como arquivo lidos por ferramentas como AutoCAD ou Solid Works. Todavia, assim como alguns terrenos apresentavam problemas, alguns arquivo STL geravam objetos com nenhuma face dentro do software, o que impossibilitava qualquer tipo de calculo. Sendo assim, embora para determinados casos o STL tenha funcionado, recomenda-se a conversão dos objetos para Collada antes de serem utilizados no programa. Essa conversão pode ser feita utilizando sites gratuito disponível na WEB.

Outro desafio encontrado foram os tempos de simulação. As simulações mais rápidas são as do modelo Vertical Plane, enquanto as mais complexas e demoradas são do X3D. Fatores como número de grids de receptores, número de objetos, número de frequências analisada, precisão do solo, difração do solo ativada e espalhamento difuso (*diffuse scattering*) aumentam em muito os tempos de propagação.

Esse comportamento foi analisado em 50 simulações realizadas ao longo do trabalho, onde variavam-se características como o número de transmissores (# Tx), o número de

frequências utilizadas por simulação (# Freq.), o número de alturas distintas dos transmissores (# H), os tipos e quantidade de receptores (Tipo Rx (#)) e o número de difrações (# Dif.). A Tabela C.1 mostra uma média das variações dos tempos de simulação para os casos analisados. Em todos esses casos foram utilizados os mesmos terrenos (Plano 200x200 de solo seco), objetos com mais de 140 mil faces, ondas senoides de 10 MHz de banda, receptores omnidirecionais à 7,1 m de altura, modelo de propagação X3D, transmissores do tipo dipolos lineares, ângulo de espaçamento dos raios de 0,25, 06 reflexões e nenhuma transmissão nem difração do solo.

Tabela C.1: Tempos Médios de Simulação para algumas configurações testadas

# Tx	# Freq.	# H	# Dif.	Tipo Rx (#)	Tempo Médio (h)
1	1	1	1	Vertical (1596)	00:03:46
1	1	1	2	Horizontal (2601)	00:05:45
1	1	1	2	Vertical (1596)	00:06:16
1	1	1	3	Horizontal (2601)	00:42:57
1	1	1	3	Vertical (1596)	01:11:12
1	1	1	3	Ambos (2601 e 1596)	02:24:03
3	1	3	3	Horizontal (2601)	01:40:24
3	1	3	3	Vertical (1596)	02:56:35
3	1	3	3	Ambos (2601 e 1596)	44:21:35
3	3	1	3	Vertical (1596)	<sup>1</sup> 113:00:00
3	3	1	3	Ambos (2601 e 1596)	<sup>2</sup> 44:25:23

<sup>1</sup>Simulação Cancelada pois não havia terminado os cálculos para nenhum transmissor.

<sup>2</sup>Simulação Cancelada pois não havia realizado os cálculos de nenhum receptor.

Da Tabela C.1 é possível ver como o emprego de mais de uma frequência gera um aumento significativo nas simulações, tornando o tempo de calculo inviável, e por vezes, nem conseguindo completar as simulações. Também é possível notar o grande aumento no tempo quando são colocado receptores em planos ortogonais numa mesma simulação, causando um grande aumento. Sendo assim, com base nesses tempos, verificou-se que é melhor rodar simulações em tempos diferentes, tentando evitar receptores ortogonais e a utilização de mais de uma frequência.