



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
TELECOMUNICAÇÕES

Desenvolvimento de um Modelo de Propagação Determinístico do Bosque Camilo Viana, Baseado no Traçado de Raios, para a Predição da Potência Recebida do Sinal em Redes IoT

Adan da Silva Rocha

UFPA / ITEC / FCT
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
TELECOMUNICAÇÕES

Adan da Silva Rocha

**Desenvolvimento de um Modelo de Propagação Determinístico do
Bosque Camilo Viana, Baseado no Traçado de Raios, para a
Predição da Potência Recebida do Sinal em Redes IoT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia da Computação e Tele-
comunicações da Universidade Federal do Pará,
como requisito parcial para a obtenção do Grau
de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros

UFPA / ITEC / FCT
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES

Desenvolvimento de um Modelo de Propagação Determinístico do Bosque Camilo Viana, Baseado no Traçado de Raios, para a Predição da Potência Recebida do Sinal em Redes IoT

AUTOR: Adan da Silva Rocha

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO À FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada em: 04/09/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FABRICIO JOSE BRITO BARROS**
Data: 01/10/2025 15:49:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros
(Orientador - FCT / ITEC / UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO SOUZA LYRA CASTRO**
Data: 01/10/2025 13:16:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro
(Avaliador 1 - FACOMP-Castanhal / UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **ALAN BRENO SOARES CORREA**
Data: 29/09/2025 15:45:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alan Breno Soares Correa, M.Sc.
(Avaliador 2 - PPGEE / ITEC / UFPA)

VISTO:

Profa. Dra. Yomara Pinheiro Pires
(Diretora da FACOMP-Castanhal / UFPA)

Aos meus pais Marivalda e Adilson, por toda a dedicação, sacrifício e cuidado.

Agradecimentos

À minha família, Adilson Rocha, Marivalda Rocha, Malu Rocha por serem os arquitetos e os esteios desta caminhada.

Aos meus avós Ana Nunes, Arinos Alves, Adilson Olinto e Maria Joana, e à outra avó de coração Nazaré Cardoso pelas orações e incentivos.

À minha família de coração Maria Dalgisa, Patrick Gonçalves e Maria Heloísa todo o cuidado e companheirismo.

Aos meus tios por toda ajuda.

À todos os professores da Faculdade de Computação e Telecomunicações - FCT, da Faculdade de Computação - FACOMP e outras, que participaram da minha formação e também compartilharam amizades.

Aos professores, Fabrício Barros, Jasmine Priscyla, Nilton Rodolfo e José Jailton, pela parceria, empatia e lições de vida. Especialmente o Professor Fabrício e a Professora Jasmine com quem tive a honra de ser pesquisador no Laboratório de Computação e Telecomunicações - LCT.

Ao Hewerton Izan da FCT, pela parceria e grande ajuda no decorrer do curso.

Aos pesquisadores do LCT pelo companheirismo, tornando os dias da graduação mais empolgantes. Em especial, ao Henry Ferreira e Artur Andrade pela amizade construída; e Lucian Ribeiro e Alan Breno pelos direcionamentos e colaborações que permitiram a realização deste trabalho.

E por fim, a todos que contribuíram para esta conquista, expresso meus sinceros agradecimentos! Sem a colaboração de cada um de vocês, chegar até aqui não teria sido possível.

Obrigado de coração!

*“A razão engana-nos mais frequentemente que a natureza.”
(Luc de Clapiers Vauvenargues)*

Resumo

O presente trabalho produziu um modelo de propagação determinístico do Bosque Camilo Viana, baseado no traçado de raios, para a predição da potência recebida do sinal. A região fica localizada na Universidade Federal do Pará (UFPA) e possui vegetação característica de bioma amazônico de clima tropical. Nela, foram estudados os efeitos dessa vegetação em sinais fornecidos por uma rede *LoRa*, uma das arquiteturas-chave de conectividade para a internet das coisas. O modelo de predição foi desenvolvido no simulador *Wireless InSite* utilizando as técnicas *Full 3D* e *X3D-Weissberger*. E propôs um Bosque de vegetação homogênea representado por um único sólido 3 *D*, onde um transmissor foi posicionado externamente e lançará raios com destino a receptores posicionados internamente, gerando como saída a potência recebida e os percursos de propagação dos raios nesses pontos. Posteriormente, essa previsão determinística foi comparada com medições e com os modelos empíricos de vegetação de *Weissberger*, *ITU-R*, *FITU-R* e *COST 235*, para avaliar a simulação e validar o modelo proposto. E os resultados da simulação mostraram que os modelo *Full 3D* e *X3D-Weissberger* obtiveram melhores predições que os modelos empíricos, com *RMSE* de 13.23 e 17.33 respectivamente. Porém, somente o *Full 3D* considerou bem a variabilidade do canal do bosque, juntamente o modelo *ITU-R*, que obtiveram valores de *DP* de 22.92 e 15.66 respectivamente, com o *ITU-R* o mais próximo das medições, com um *DP* de 18.13. Em contrapartida com um valor de *DP* de 12.12 do modelo *X3D-Weissberger*. Sendo então, o modelo *Full 3D* o qual mais se adequou aos dados das medições, validando o modelo proposto.

Palavras-chave: IoT. LoRa. Vegetação. Modelos de Propagação. Traçado de Raios. Wireless InSite. Potência Recebida

Abstract

This work produced a deterministic propagation model for the Camilo Viana Forest, based on ray tracing, to predict received signal strength. The region is located at the Federal University of Pará (UFPA) and features vegetation characteristic of the tropical Amazon biome. The study studied the effects of this vegetation on signals provided by a LoRa network, one of the key connectivity architectures for the Internet of Things. The prediction model was developed in the Wireless InSite simulator using Full 3D and X3D-Weissberger techniques. It proposed a forest with homogeneous vegetation represented by a single 3D solid, where a transmitter is positioned externally and will send rays to receivers positioned internally, generating the received power and the ray propagation paths at these points as output. Subsequently, this deterministic forecast was compared with measurements and the empirical vegetation models of Weissberger, ITU-R, FITU-R, and COST 235, to evaluate the simulation and validate the proposed model. The simulation results showed that the Full 3D and X3D-Weissberger models obtained better predictions than the empirical models, with RMSE of 13.23 and 17.33, respectively. However, only Full 3D properly considered the variability of the forest channel, along with the ITU-R model, which obtained DP values of 22.92 and 15.66, respectively. ITU-R was the closest to the measurements, with a DP of 18.13. In contrast, the X3D-Weissberger model had a DP of 12.12. Therefore, the Full 3D model best fitted the measurement data, validating the proposed model.

Key-words: IoT, LoRa, Vegetation. Propagation Models. Ray Tracing. Wireless InSite. Received Power.

Lista de figuras

Figura 1 – A Sanduicheira <i>IoT</i>	9
Figura 2 – Comparação das Redes Sem Fio em Relação a Taxa de Dados e Alcance de Comunicação	11
Figura 3 – Camadas da rede LoRaWAN	11
Figura 4 – Topologia de um Rede LoRa (LoRa/LoRaWAN)	13
Figura 5 – Lançamento dos raios do método SBR	21
Figura 6 – Estrutura das Features no Wireless InSite	23
Figura 7 – Cenário contendo transmissores (verde) e receptores (vermelho)	24
Figura 8 – Percursos de Propagação dos Raios	25
Figura 9 – Transformação linear de Möller–Trumbore	27
Figura 10 – Imagem via satélite da região de estudo: a) Vermelho - UFPA; b) Amarelo - Setores Básico (à esquerda) e Profissional (à direita); c) Azul - Bosque Camilo Viana	29
Figura 11 – PrintScreen do Bosque e a Rota de Medições	31
Figura 12 – Ferramenta régua aplicada à barra de escala	31
Figura 13 – Objeto Terreno (criado em torno da imagem)	33
Figura 14 – Objeto Folhagem: a) Vista oblíqua (lado esquerdo); b) Vista vertical (lado direito)	34
Figura 15 – Propriedades do material da folhagem	35
Figura 16 – Topologia do Rádio Enlace: a) Verde: Transmissor, b) Vermelho: Receptores	37
Figura 17 – Delimitação da Área de Estudo	38
Figura 18 – Rota da medição a) Posicionamento de Tx e Rx b) Métricas da Rota	40
Figura 19 – RSSI x Distância	41
Figura 20 – RSSI e ESP x Distância	42
Figura 21 – Profundidade do Receptor no Bosque 3D	44
Figura 22 – Predição da Potência Recebida da Simulação	47
Figura 23 – Perda de Percurso	49
Figura 24 – Percursos de Propagação	49
Figura 25 – Mecanismos da progação em Rx1	50
Figura 26 – Variação da Potência em cada raio recebido	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre trabalhos correlatos e esta pesquisa	7
Tabela 2 – Propriedades de importação da imagem	33
Tabela 3 – Propriedades do Material do Terreno	34
Tabela 4 – Parâmetros da Onda Portadora	35
Tabela 5 – Configurações da Antena	36
Tabela 6 – Parâmetros do Transmissor	37
Tabela 7 – Parâmetros do Receptores	37
Tabela 8 – Propriedades da Área de Estudo	39
Tabela 9 – Métricas da Rota de Medição	40
Tabela 10 – Comparação dos valores de RMSE e DP dos modelos analisados	48
Tabela 11 – Tempos de execução dos algoritmos do traçado de raio	52

Lista de abreviaturas e siglas

2D	<i>Two Dimensions</i>
2,5D	<i>Pseudo Três Dimensões</i>
3D	<i>Three Dimensions</i>
3D-RL	<i>Three Dimensions Ray Launching</i>
5G	<i>Quinta Geração de Redes Móveis</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CI	<i>Close-In</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DTED	<i>Digital Terrain Elevation Data</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
ESP	<i>Expected Signal Power</i>
FI	<i>Float Intercept</i>
FITU-R	<i>Fitted ITU-R</i>
GO	<i>Geometrical Optics</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRNN	<i>General Regression Neural Network</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunication</i>
IUM	<i>International Islamic University Malaysia</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machines</i>

LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide-Area Network</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MLPNN	<i>Multilayer Perceptron Neural Network</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
NLoS	<i>Non-Line of Sight</i>
NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i>
OEM	Ondas Eletromagnéticas
PLE	<i>Path Loss Exponent</i>
PRE	Potência Recebida Estimada
PL	<i>Path Loss</i>
PR	Potência Recebida
PHP	<i>PHP Hypertext Preprocessor</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
Rx	<i>Receiver</i>
SBR	<i>Shooting and Bouncing Rays</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
T-R	Transmissor-Receptor
Tx	<i>Transmitter</i>
UFPA	Universidade Federal do Pará
UPNA	<i>Public University of Navarre</i>
USM	<i>Universiti Sains Malaysia</i>

USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i>
V	Vertical
VV	Vertical-Vertical
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WQM	<i>Water Quality Monitoring</i>
WI	<i>Wireless Insite</i>
ERP	<i>Effective Radiated Power</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação
RT	<i>Ray Tracing</i>

Lista de símbolos

Att	Atenuação por vegetação (dB)
c	Velocidade da luz no vácuo (m/s)
s	Segundo
d	Distância de separação (m) ou Profundidade de vegetação (m)
dB	Decibel
$dBmW$	Decibel miliwatt
dBm	Decibel miliwatt
dB_i	Decibel Isotrópico
f	Frequência (Hz, MHz, GHz)
G_r	Ganho da antena receptora (adimensional)
G_t	Ganho da antena transmissora (adimensional)
h	Altura (m)
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
KHz	Quilohertz
MHz	Megahertz
ph	Potential of hydrogen
L	Fator de perda do sistema (adimensional)
m	Metro
mW	Miliwatt
P_r	Potência Recebida (W ou dBm)
P_t	Potência Transmitida (W ou dBm)
R	Raio médio da Terra (m)

t	Tempo (s) ou Distância ao longo do raio (m)
α	Ângulo (graus ou radianos)
λ	Comprimento de onda (m)
φ	Latitude (graus decimais)
θ	Longitude (graus decimais)
ε	Permissividade relativa (adimensional)
σ	Condutividade (S/m) e Desvio padrão
S/m	Siemens por metro
π	Razão entre o comprimento da circunferência e seu diâmetro
w	Watts
dB/m	Decibel acumulado a cada metro (notação do <i>software Wireless InSite</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo Geral	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	Organização da Dissertação	3
2	TRABALHOS CORRELATOS	4
2.1	Considerações Iniciais	4
2.2	Descrição dos Trabalhos Correlatos	4
2.3	Comparativo entre os Trabalhos Correlatos	6
2.4	Considerações Finais	7
3	REFERENCIAL TEÓRICO	8
3.1	Considerações Iniciais	8
3.2	Internet das Coisas (IoT)	8
3.2.1	Um breve histórico	8
3.2.2	Conceito	9
3.3	Redes LoRa	10
3.3.1	LoRa	12
3.3.2	LoRaWAN	13
3.4	Rádio Propagação	14
3.4.1	Propagação do Espaço Livre	14
3.4.2	Propagação Multipercurso	14
3.4.2.1	Reflexão	14
3.4.2.2	Refração	15
3.4.3	Modelos de Propagação	15
3.4.3.1	Modelos de Propagação Empíricos	15
3.4.3.2	Modelos de Propagação Determinísticos	15
3.4.3.3	Modelo do Espaço Livre	16
3.4.3.4	Modelos para Vegetação	17
3.4.3.5	Modelo Weissberger	17
3.4.3.6	Modelo ITU-R	18
3.4.3.7	Modelo FITU-R	18
3.4.3.8	Modelo COST 235	18
3.5	Traçado de Raios	19
3.5.1	Cálculo dos Campos	19

3.5.2	Modelagem do Cenário	19
3.5.2.1	Cenários 3D	19
3.5.2.2	Cenários 2D	19
3.5.2.3	Cenários 2,5D	19
3.5.2.4	Características Elétricas	20
3.5.3	Método SBR	20
3.5.4	Validação do Método	21
3.5.4.1	Raiz do Erro Médio Quadrático	21
3.5.4.2	Desvio Padrão	22
3.5.5	Wireless InSite	23
3.6	Algoritmo de Interseção Raio-Triângulo	25
3.7	Considerações Finais	27
4	METODOLOGIA	29
4.1	Considerações Iniciais	29
4.2	Região de Estudo	29
4.3	Etapas da Simulação	30
4.3.1	Modelagem do Cenário	30
4.3.2	Modelagem do Rádio Enlace	35
4.3.3	Definição da Área de Estudo	38
4.4	Tratamento das Medições	39
4.4.1	Distância de Separação Tx-Rx	39
4.4.2	RSSI e ESP	40
4.5	Modelos Empíricos para Vegetação	42
4.5.1	Potência Recebida	42
4.5.2	Profundidade	43
4.6	Avaliação da simulação	44
4.7	Considerações Finais	45
5	RESULTADOS	46
5.1	Considerações Iniciais	46
5.2	Resultados da Simulação	46
5.2.1	Potência Recebida	46
5.2.2	Percursos de Propagação	49
5.2.3	Complexidade Computacional	51
5.3	Considerações Finais	52
6	CONCLUSÃO	53
	Referências	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Estamos vivendo na era da informação e comunicação, onde, cada vez mais, as diversas tecnologias e até objetos comuns estão sendo reformulados para terem, dentre outras, a capacidade de se conectarem.

Isso, está causando alterações significativas nas *Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs)* vigentes, fazendo surgir novos paradigmas. Um novo conceito que surgiu com isso, foi a chamada Internet das Coisas (*Internet of Things, IoT*), onde a internet deixa de conectar apenas computadores e passa a conectar também as "coisas" ou os objetos do dia a dia [1].

Conectar os objetos do dia a dia, significa menor interação física e maior automação das tarefas e isso está trazendo uma nova revolução na forma como vivemos, nas mais diversas áreas, como por exemplo os *campus universitários* [2].

As arquiteturas responsáveis pela conectividade *IoT*, são chamadas de *Low-Power Wide-Area Network (LPWANs)* [3], que fornecem conexões para longas distâncias, exigindo baixo consumo de energia do dispositivo, dois requisitos principais desse novo tipo de rede. Assim, dentre as várias arquiteturas criadas, podemos destacar as redes *Long Range (LoRa) / Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)* [4], que utilizam modulação inspirada em tecnologias de radares, para atingir esses dois objetivos.

Só que, para implantação e operação dessas redes em determinada região, é necessário a realização de bons estudos de conectividade para esse ambiente, pois operam de forma diferente das conexões tradicionais. E esses estudos são feitos através dos modelos de propagação, que vão mapear a distribuição do sinal ao longo do meio e apontar os níveis de potência recebidos nesses locais [5].

Dentre os modelos de propagação mais utilizados hoje em dia, os modelos determinísticos - que na prática utilizam simulações computacionais [5] - estão ganhando cada vez mais ênfase. Isso porque, com os avanços da computação, as simulações para estudo dos enlaces, estão cada vez mais precisas, práticas e viáveis.

Assim, é notável perceber que, mesmo com o surgimento de novos conceitos e tecnologias de conexão, todas elas passam por estudos eletromagnéticos para serem implantadas e avaliadas. Os quais estão utilizando cada vez mais as novas técnicas computacionais. Porém, não descartando as ferramentas tradicionais - modelos empíricos - e sim usando-as em conjunto, para criar uma rede com a melhor qualidade possível para os usuários.

1.2 Motivação

Tornar a Universidade Federal do Pará (UFPA) conectável à internet das coisas já é possível, porém não tão simples. Isso porque, por mais que as redes do tipo *LPWAN - LoRa/LoRaWAN* - sejam apropriadas para a grande extensão do *Campi*, ao longo dessa área há a presença diferentes cenários de propagação, como por exemplo, áreas só de vegetação, áreas somente de edificações (pequeno e grande porte), áreas mistas de vegetação e construções e entre outras, o que prejudica distribuição de forma homogênea de uma conectividade de boa qualidade para a comunidade. Sendo assim, faz-se necessário estudos de conexão específicos para cada um desses cenários, o que será feito neste trabalho, através de técnicas determinísticas, com as redes *LoRa*, para uma região somente de vegetação.

1.3 Objetivos

Os objetivos desta pesquisa são apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho objetiva criar um modelo de propagação determinístico baseado na técnica do traçado de raios para estudar a propagação de sinais *LoRa* na região do bosque Camilo Viana, uma área somente com vegetação, localizada nas dependências da *UFPA*.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Fazer o levantamento de características relevantes da vegetação do bosque;
- Utilizar o *software Wireless InSite (WI)* para a simulação;
- Modelar o bosque preservando suas dimensões reais;
- Simular uma rede *LoRa* no ambiente do bosque;
- Utilizar a técnica do Traçado de Raios (*Ray Tracing, RT*) para propagação do sinal;
- Fazer a predição da potência recebida
- Analisar os percursos de propagação dos raios;
- Comparar o resultado da simulação com os da Medição feita no bosque em termos de potência recebida;
- Comparar a predição dos modelos *Full 3D* e *X3D-Weisberger* do *Wireless InSite*;

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

- No capítulo 1 (este capítulo) é feita uma contextualização do tema da pesquisa. Em seguida, são apresentadas as motivações que a impulsionaram e quais os objetivos se pretendem atingir com sua produção;
- No capítulo 2 é apresentado os trabalhos correlatos com a pesquisa feita nessa dissertação;
- No Capítulo 3 é explicado o referencial teórico necessário para compreensão dos princípios técnicos e científicos desta pesquisa;
- No capítulo 4 é descrita toda a metodologia utilizada para a produção e execução do projeto;
- No Capítulo 5 é analisado os resultados obtidos na pesquisa;
- E por fim no capítulo 6 é apresentado as conclusões do estudo feito.

2 TRABALHOS CORRELATOS

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados alguns trabalhos relacionados a esta pesquisa desenvolvida, focando na região estudada, a tecnologia de conectividade implantada e os modelos de propagação utilizados para análise desta conectividade.

2.2 Descrição dos Trabalhos Correlatos

Em [6], foi criado um sistema sem fio na Universidade Pública de Navarra (*UPNA*), utilizando conectividade *LoRaWAN* e *ZigBee*, que permitiram ao usuário monitorar o status das árvores do Jardim Botânico em tempo real, por meio de uma plataforma baseada em nuvem.

O sistema foi planejado e implantado usando análise determinística por meio do algoritmo *Three Dimensions Ray Launching (3D-RL)* do traçado de raios, campanhas de medições e depois testes em nível de sistema, em uma nuvem física do *campus*.

No Algoritmo *3D-RL* todos os elementos existentes no jardim foram considerados, como troncos de árvores, folhagens, poste de iluminação pública e grama além das edificações próximas, sendo modelados cada um individualmente. Além de considerar também a propagação próxima e acima do solo, por meio das alturas do transmissor de 0, 1 m e 1, 1 m e situações *Line of Sight (LoS)* e *Non-Line of Sight (NLoS)* entre as antenas. Utilizando-se três frequências de operação 868 MHz, 2,4 GHz.

Em [7], foi implantando um sistema *IoT* para Monitoramento de Qualidade da Água (*Water Quality Monitoring, WQM*), pelo nível de *Ph* e da temperatura, em um lago da *Universiti Sains Malaysia (USM)* em área de vegetação, por meio de conectividade *ZigBee*.

Esse sistema utilizou etiqueta *Radio-Frequency Identification (RFID)* como sensor, um *gateway*, um servidor de nuvem e um aplicativo desenvolvido em linguagem *Android*, com um sistema de disparo de alertas na linguagem *PHP Hypertext Preprocessor (PHP)*.

Para analisar a conectividade, medições foram feitas, utilizando frequência de 920 MHz, cenários *LoS* e *NLoS*, a uma altura de recepção de 1,5 m, coletando-se o *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* a cada 100 m de distância. Assim foi constatado um alcance máximo de até 6,5 km para antenas *LoS* e um alcance máximo de 900 m para situações *NLoS* em área de vegetação. Validando então a conectividade do sistema.

Em [8], foi proposto um estudo no *campus* da *International Islamic University Malaysia (IIUM)*, *Gombak* para analisar a atenuação da folhagem de clima tropical e sua contribuição para

o cálculo da perda de percurso utilizando redes *LoRa*.

Assim, foram feitas medições de *RSSI*, em cenários *LoS* e *NLoS*, utilizando-se dois módulos *LoRa* para simular a comunicação, na frequência de 915 *MHz*, com Fator de Espalhamento: 10 e Largura de banda: 125 *kHz*.

As medições analisaram a cobertura *LoRa* movendo a antena do receptor pelo campus do *IIUM*. Mas não só isso, estudaram também a contribuição da perda de percurso de cinco tipos de árvores - *Licuala Grandis*, *Mimusops Elengi*, *Mangifera Indica*, *Cyrtostachys Renda* e *Livistona Chinensis*, para diferentes cruzamentos de caminho (por exemplo, tronco, copa e galhos). Além de compara-las com os modelos *Okumura/Hata*, *Sombreamento Log-Normal* e *Vegetação e Folhagem*. Constando que, essas cinco espécies apresentam diferentes atenuações da folhagem devido às diferentes densidade da copa, tronco e ao tipo de folha.

Em [9], foi estudada a tecnologia *LoRa/LoRaWAN* no campus da *Universidade Federal do Pará - UFPA*, em zona costeira de rio com vegetação densa, para ofertar serviços inteligentes à comunidade local por meio da internet das coisas, tornando-o um *Smart Campus*.

Para isso, foi utilizado um *Gateway-LoRa* no prédio mais alto da universidade e um nó final *LoRa* acoplado em um drone a percorrer as margens do rio. Este enviava pacotes, utilizando o *SpreadingFactor(SF)* 7, *SF* 8 e *SF* 9, na frequência de 915 *MHz* e largura de banda de 125 *kHz*. E o *Gateway* os capturava e analisava o *RSSI*, *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* e os dados de pontos geolocalizados nos vários fatores de espalhamento.

Com isso, foi ajustado os modelos empíricos de propagação *Close-In (CI)* e *Float Intercept (FI)*, para previsão de perda de caminho de *uplink*, gerando novos valores de Expoente de Perda de Caminho (*Path Loss Exponent, PLE*) que consideram a vegetação (de acordo com a recomendação *P-833* da *ITU-R*) e comparados com o modelo *Okumura-Hata*. E além disso, foram calculados também a taxa de pacotes recebidos para avaliar a qualidade do canal para a camada física *LoRa*. Assim, constou-se que, os modelos *CI* e *FI* foram bem parecidos com o modelo recentemente proposto, demonstrando maior precisão na estimativa da perda de rádio em cenários de vegetação densa, apresentando valores de Erro Quadrático Médio (*Mean Squared Error, MSE*) mais baixos do que o modelo *Okumura-Hata*, particularmente para o *SF* 9. Sendo que, o limite de cobertura do raio, considerando a mobilidade dos nós, foi de 945 *m*.

Em [10] é feito um estudo sobre o impacto das árvores amazônicas na qualidade do sinal, utilizando redes *LoRa*, numa região de bosque da *UFPA*).

Para isso, campanhas de medições foram realizadas utilizando dispositivos *LoRa*, configurados com frequência de 915 *MHz*, largura de banda de 125 *KHz* e usando somente *SF* 12. Coletando-se dados, entre coordenadas geográficas *RSSI* e *SNR*.

E depois utilizava-se os dados medidos para se criar dois modelos de propagação a partir de uma Rede Neural de Regressão Geral (*General Regression Neural Network, GRNN*) e uma Rede Neural Perceptron Multicamadas (*Multilayer Perceptron Neural Network, MLPNN*), sendo

posteriormente comparados com os modelos de propagação *CI* e *FI*, e os modelos adaptados para vegetação *International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector (ITU-R)*, *Weissberger*, *COST 235* e *Fitted ITU-R (FITU-R)*). Apresentando maior capacidade preditiva do comportamento médio do sinal em comparação com esses modelos clássicos da literatura. Com o *GRNN* possuindo melhor vantagem computacional que o *MLPNN*, mas tecnicamente a mesma acurácia de predição.

2.3 Comparativo entre os Trabalhos Correlatos

Além da descrição, foi realizado um comparativo entre os trabalhos correlatos, apresentado na Tabela 1 a seguir, onde resumidamente foram destacado os tópicos mais relevantes de cada projeto em relação a esta pesquisa.

Tabela 1 – Comparativo entre trabalhos correlatos e esta pesquisa

Referência	Cenário	Conexão	Modelo de Propagação	Especificações
[6]	Jardim Botânico: Vegetações e Edificações	LoRaWAN e ZigBee	Traçado de Raio 3D-RL e Medições	Frequência: 868MHz e 2.4GHz, Largura de Banda: -, Potência Tx: 14dBm e 25dBm
[7]	Lagoa: Aquático e Vegetação	Digi Mesh	Medições	Frequência: 920MHz, Largura de Banda: -, Potência Tx: 18dBm
[8]	Campus Universitário: Vegetações e Edificações	LoRa	Okumura-Hata, Sombreamento Log-Normal, Vegetação e Folhagem e Medições	Frequência: 915MHz, Largura de Banda: 125KHz, Potência Tx: 20dBm
[9]	Zona Costeira de Rio: Aquático e Vegetação	LoRaWAN	Okumura-Hata, FI, CI e Medições	Frequência: 915MHz, Largura de Banda: 125KHz, Potência Tx: 20dBm
[10]	Bosque: Vegetação	LoRa	CI, FI, Early ITU-R, COST235, Weissberger e FITU-R e Medições	Frequência: 915MHz, Largura de Banda: 125KHz, Potência Tx: 5dBm
Este Trabalho	Bosque: Vegetação	LoRa	RT Full 3D, RT X3D-Weissberger e Medições	Frequência: 915MHz, Largura de Banda: 125KHz, Potência Tx: 5dBm

Fonte: O Autor

2.4 Considerações Finais

A partir da análise dos trabalhos presentes no estado da arte, foi possível observar que a tecnologia *LoRa/LoRaWAN* é bastante empregada para fornecer conectividade *IoT* em zonas verdes. Porém, o uso do Traçado de Raios ainda é pouco explorado para avaliar essa conexão, sendo então este trabalho, uma notável contribuição para está técnica de predição.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos sobre as tecnologias e teorias utilizadas neste trabalho. Iniciando por uma introdução à Internet das Coisas, seguida de uma de suas redes-chave, as redes *LoRa*. Depois, serão abordados os conceitos relevantes da rádio propagação e por fim a técnica do Traçado de Raios e o *software Wireless InSite* que reproduzirá esse algoritmo na pesquisa.

3.2 Internet das Coisas (IoT)

3.2.1 Um breve histórico

Na década de 1990, a Internet ainda estava em seus primórdios com apenas 313,000 computadores ligados à rede, quando Dan Lynch, presidente da Interop, teve uma ideia inusitada. Ele lançou um desafio propondo que os objetos do dia a dia fossem conectados à internet. Então, John Romkey e sua equipe desenvolveram uma torradeira inteligente, que podia ser controlada, ligada ou desligada, online. Ela foi apresentada na INTEROP '89 Conference e seria um dos primeiros dispositivos domésticos a serem conectados à Internet, como mostra a Figura 1. Porém, na mesma feira, também foram apresentados um *CD Player* e um Boneco de Cão Latidor que também eram conectáveis [11], surgindo então, as primeiras ideias do que hoje é chamado internet das coisas.

Figura 1 – A Sanduicheira *IoT*

Fonte: [11]

3.2.2 Conceito

A internet das coisas é um novo ramo de conectividade da internet, em que, dá a possibilidade de conectar não só computadores, mas também as coisas ou objetos ao nosso redor.

As coisas vão desde os mais simples do cotidiano, como televisão, geladeira, lâmpadas, janelas, etc... até mesmo aos mais sofisticados da indústria, como as esteiras de produção, braços robóticos, veículos autônomos de armazém e entre outros, alcançando praticamente tudo ao nosso redor [3].

Ocasionalmente uma nova revolução no estilo de vida da sociedade, em praticamente todas as áreas. A qual, traz novas formas de interação Humano-Objeto e também Objeto-Objeto, transpassando o espaço e tempo. De qualquer lugar e a qualquer momento, você pode interagir com as coisas ou elas podem interagir entre si. Aumentando a velocidade, produtividade, automação e autonomia das atividades, com cada vez menos interferência humana [1], fazendo parte de um novo conceito chamado "coisas inteligentes" (*Smart Things*).

Exemplos de usos da *IoT*:

- **Acessórios Vestíveis (*Wearable*):** São os acessórios que usamos no corpo, como relógios *Smartwatch*;
- **Saúde (*Healthcare*):** Ajudam a informar em tempo real o estado clínico do paciente e alimentar o prontuário;

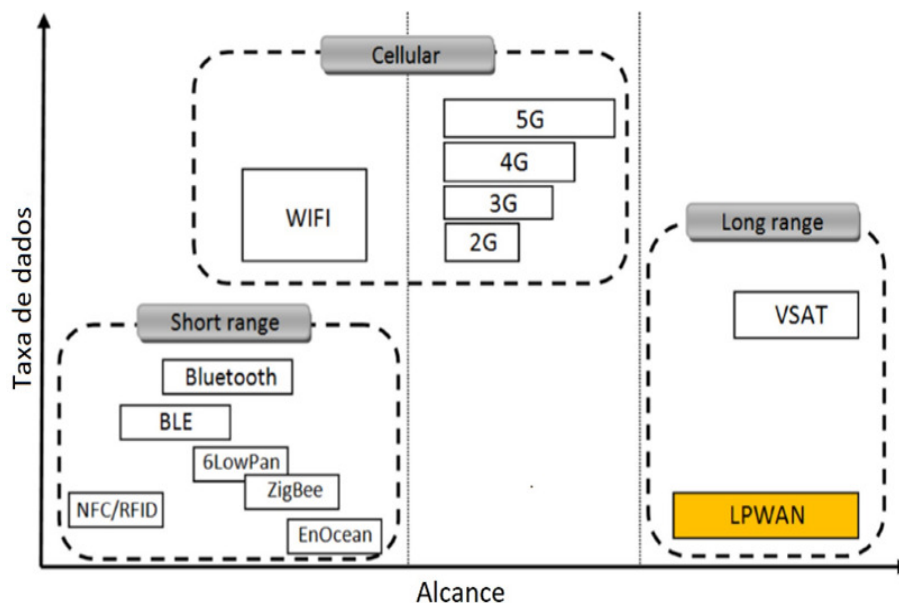
- **Casas Inteligentes (*Smart Home*):** São os aplicativos e dispositivos que controlam os eletrodomésticos, móveis e objetos da casa;
- **Campus Inteligente (*Smart Campus*):** Melhoraram a qualidade dos serviços da universidade e metodologia de ensino;
- **Cidades Inteligentes (*Smart Cities*):** Fornece serviços públicos, levanta informações relevantes para as autoridades e população de forma autônoma;
- **Agricultura Inteligente (*Smart Farming*):** Ajuda no monitoramento da temperatura, da umidade do solo, do ar, do controle de pragas. Facilitando a colheita, plantil e saúde das culturas implantadas;
- **Industria inteligente (*Smart Industry*):** Mapea, classifica e utiliza os dados gerados na linha de produção, melhorando a precisão dos serviços e evitando desperdícios;
- **Transporte inteligente (*Smart Traffic*):** Ajuda na mobilidade urbana, reduz acidentes e monitora problemas de infraestrutura dos sistemas transportes.

3.3 Redes LoRa

As Redes *LoRa* são uma nova forma de conectividade sem fio (*wireless*) que surgiu com o advento da *IoT*, do tipo *LPWAN*), assim como as redes *Sigfox*, *Narrowband Internet of Things* (*NB-IoT*), *Long Term Evolution for Machines* (*LTE-M*) e outras [12].

Elas foram criadas para atender a esse novo cenário de conexão com as "coisas", a saber, baixo consumo de energia, alta densidade de dispositivos conectados, alto tráfego com baixa taxa de dados, grandes áreas de cobertura e etc. Sendo portanto, conexões de longa distância e baixa potência, que diferem das arquiteturas de comunicações tradicionais, como mostra a Figura 2.

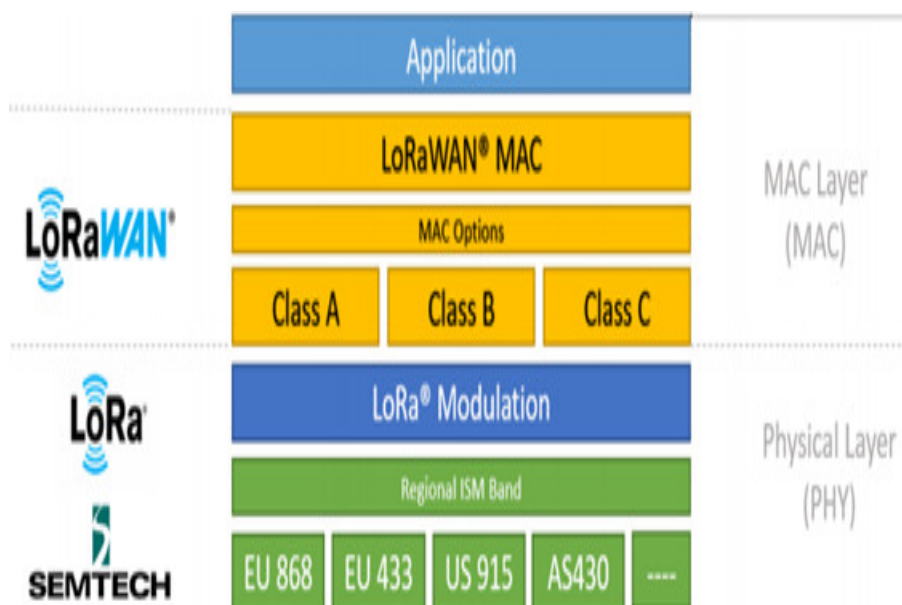
Figura 2 – Comparação das Redes Sem Fio em Relação a Taxa de Dados e Alcance de Comunicação



Fonte: [13]

Dessa forma, temos que, uma rede *LoRa* é composta pela seguinte arquitetura de camadas, composta de pilhas de protocolos, exibida na Figura abaixo:

Figura 3 – Camadas da rede LoRaWAN



Fonte: [14]

3.3.1 LoRa

LoRa é um acrônimo de *Long Range*, e refere-se a técnica de propagação e modulação de dados sem fio (transmissão), pertencente portanto à Camada Física, a camada mais baixa da arquitetura.

Ela foi desenvolvida pela *startup Cycleo SAS (Grenoble, França)*, depois adquirida pela *Semtech Corporation (EUA)* em 2012, com a aquisição da *Cycleo*, e posteriormente patenteada pela mesma, sendo tecnologia proprietária desde de 2013 [13].

Isso significa que, as informações sobre o designe e implementação dos seus chips e dispositivos não são disponibilizadas pela *Semtech*, sua fabricante, somente seu uso e implantação através dos manuais [14]. Porém, a implantação das redes são abertas e descentralizadas o que significa que podem ser implementadas sem restrições, até redes privadas são possíveis [12], desde que, cumpram as especificações dos órgãos regulamentadores.

Essa técnica, opera nas bandas de frequência não licenciadas chamadas *Industrial, Scientific and Medical (ISM)*, de uso não comercial, destinadas para fins industriais, científicos e médicos, para contribuir com seus respectivos desenvolvimentos.

Além disso, baseia-se na modulação *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, usada inicialmente para aplicações militares e agências espaciais, como por exemplo em radares e sonares, que possui características de baixa potência, longo alcance de comunicação, boa capacidade de anti-interferência e anti-ruído - atributos ideais para o propósito das redes *LoRa* [12], sendo a primeira implementação de baixo custo para uso comercial [12].

Na lista abaixo, temos alguns parâmetros configuráveis de um sinal *LoRa*:

- **Frequência da Portadora (*Carrier Frequency*):** É a frequência de operação central utilizada pelo Enlace e depende da região, por exemplo, 433 e 868 *MHz* são reservadas para a Europa, 915 *MHz* para a América do Norte e do Sul e 433 *MHz* para a Ásia [13];
- **Largura de banda (*Bandwidth, BW*):** É faixa de frequência ocupada pelo sinal modulado e também a medida de capacidade de transmissão. Quanto maior a largura de banda, maior a será a taxa de dados. Em *LoRa*, podem ser utilizados três diferentes valores de *BW*: 125 *KHz*, 250 *KHz* e 500 *KHz* [13];
- **Fator de Espalhamento (*Spreading Factor, SF*):** Indica a quantidade de *bits* que um sinal de *Chirp* ou símbolo portará. Eles variam de 7 a 12 [13]. O aumento do *SF* indica um sinal mais espalhado (maior), aumenta seu alcance da transmissão, aumenta sensibilidade do receptor (detecta sinais bem fracos), o deixa mais robusto em relação a erros, diminuiu a taxa de dados, o sinal fica mais lento (dura mais tempo no ar), aumenta o consumo de energia, etc. E são modificados de acordo com as condições de comunicação do canal.

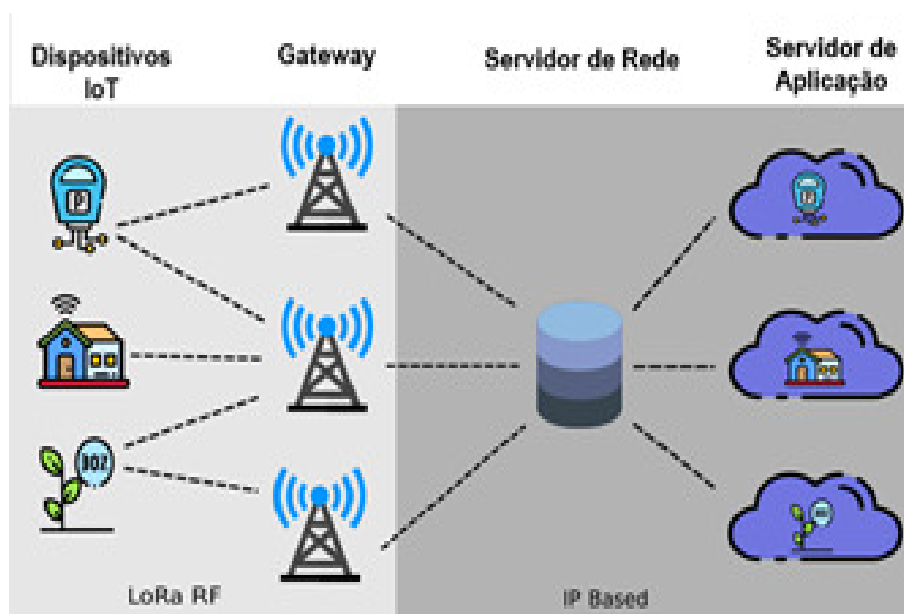
3.3.2 LoRaWAN

A tecnologia *LoRa* definiu a Camada Física, mas sobre ela foi criado o protocolo *LoRaWAN* que estabelece a Camada superior *Medium Access Control (MAC)*.

Ele foi criado como uma protocolo aberto - que pode ser modificado de acordo com o projeto - pela *LoRa Alliance* - Uma associação sem fins lucrativos formada em 2015 por gigantes da tecnologia como Cisco, IBM, Microchip, etc., com o objetivo de impulsionar o ecossistema *LoRa* para as aplicações *IoT* no mundo todo [12] - para conectar e gerenciar a rede dos objetos *IoT* (as coisas) - *LoRa* - às redes *Wide Area Network (WAN)*, como por exemplo a *Internet* - a maior rede WAN que existe, que posteriormente, serão disponibilizadas para o usuário pela camada de aplicação.

Dessa forma, temos com isso a seguinte topologia de uma rede *LoRa* completa exibida na Figura 4 a seguir:

Figura 4 – Topologia de um Rede LoRa (LoRa/LoRaWAN)



Fonte: [15]

Sendo compostas de Dispositivos Finais (*End Nodes ou End Devices*), que são os dispositivos *IoT*, os *Gateways* que são os Concentradores, um Servidor de Rede (*Network Server*) para gerenciar os dados e dispositivos, e os Servidores de Aplicação (*Application Server*) para disponibilizar os dados para os usuários. Topologia essa sendo do tipo estrela (*stars*) ou estrela de estrela (*stars-of-stars*).

3.4 Rádio Propagação

Quando nos referimos às redes *LoRa-IoT*, em um contexto mais amplo, estamos nos referindo aos *Sistemas de Telecomunicações* que operam utilizando Ondas Eletromagnéticas (*OEM*) na Frequência de Rádio (*Radio Frequency, RF*), que por sua vez são estudados através da Propagação.

A propagação é a ciência que estuda como a energia irradiada por uma antena emissora vai atingir uma antena receptora e o quanto ela irá receber[16], ou seja, como a energia é transportada e distribuída ao longo do meio [12].

3.4.1 Propagação do Espaço Livre

Quando duas antenas estão posicionados em um espaço ausente de qualquer matéria ou meio que afete a onda propagante, chamado este de Espaço Livre, a onda segue apenas um caminho direto até o receptor (*propagação monopercurso*).

Porém, mesmo sem nenhum obstáculo no ambiente - o que ocasionariam absorção e reflexão na energia do sinal (atenuações), este ainda experimenta uma perda, chama Perda do Espaço Livre, uma perda inerente das *OEM*, que aumenta conforme a distância percorrida. O vácuo é o melhor exemplo de espaço livre, mas a atmosfera também se comporta de forma bem parecida.

3.4.2 Propagação Multipercurso

Quando no ambiente de duas antenas há presença de corpos ou meios que afetem o sinal emitido, ocorre a *propagação multipercurso* (mais de um percurso). Que é quando a onda se propaga por diversos caminhos e de tamanhos variáveis [5] ao longo do meio (espalhando-se), podendo atingir ou não a antena receptora.

Nesse cenário, entram em cena os mecanismos de propagação, os quais ocorrem quando a onda colide com algum obstáculo. Dentre eles podemos destacar dois fenômenos básicos que regem essa propagação, a Reflexão e a Refração.

3.4.2.1 Reflexão

A reflexão (*R*) ocorre quando as ondas se deparam com obstáculos de dimensões muito maiores que seu comprimento de onda[5], como a superfície da terra (solo), montanhas, prédios, paredes e etc... [16]. Nela, a onda colide com a superfície refletora de um corpo e retorna para seu meio de origem. De forma que, o sinal refletido não tão forte como o sinal incidente (antes da interceptação), pois parte da energia que chega é absorvida e perdida pelo objeto envolvido [16].

3.4.2.2 Refração

Quando a onda colide com um obstáculo, e consegue atravessá-lo, dizemos que ocorreu uma refração. Ela acontece quando onda se depara com um meio de características elétricas - em termos de permeabilidade, permissividade e condutância - diferentes de seu meio de origem, que permitam ocasionar essa transição. De forma que, o sinal refratado porta menos energia que o incidente e tem sua direção alterada.

Assim, quando uma onda de rádio colide com um obstáculo ou meio, através da sua superfície (interface ou fronteira), com diferentes propriedades elétricas, ela é decomposta em duas outras ondas, uma onda refletida para o meio de origem e uma onda refratada para o segundo meio.

3.4.3 Modelos de Propagação

Os modelos de propagação são as principais ferramentas da Propagação para estudo da distribuição e recepção de energia de um enlace. Eles tradicionalmente têm focado na previsão da intensidade média do sinal recebido (desvanecimento de Larga Escala) a determinada distância de separação Transmissor-Receptor ($T-R$) [5].

Com isso, podemos destacar dois tipos de modelos de propagação, os Empíricos e os Determinísticos.

3.4.3.1 Modelos de Propagação Empíricos

Os modelos de propagação empíricos são produzidos a partir de dados coletados em medições - feitas para o sistema de comunicação implantado, onde as amostras são submetidas à análises estatísticas - como ajuste de curvas, as quais geram expressões analíticas (equações) que recriam todo o conjunto de dados [5].

Esse método tem a vantagem de levar em consideração implicitamente todos os fatores de propagação conhecidos e desconhecidos [5]. São de fácil aplicação e baixo custo computacional e podem ser reaproveitados para frequências permitidas e mesmos tipos de ambientes. Porém, caso a frequência seja diferente da exigida e/ou o ambiente for de um tipo discrepante, outros modelos devem ser produzidos, usando o mesmo processo.

3.4.3.2 Modelos de Propagação Determinísticos

Os modelos de propagação determinísticos - também chamados de físicos ou teóricos - direta ou indiretamente pautam-se nas equações de *Maxwell* - referentes à teoria do eletromagnetismo - para descrever a propagação e realizar previsões [17]. Mas na prática, geralmente usa-se simulações computacionais ou algoritmos mais simples.

Eles são bastante usados para planejamento de redes, para analisar e viabilizar sua implantação ou também realizar algum *upgrade* ou modificação. Além de serem usados também para estudos de novas tecnologias. Porém, têm a desvantagem de serem altamente especializados para o ambiente (com baixa portabilidade) e requerem bons recursos computacionais. E geralmente dados de medições são utilizados para calibrar a simulação.

Porém, apesar das diferenças, podemos dizer que a potência recebida (PR) é um dos parâmetros mais importantes a serem preditos por eles.

3.4.3.3 Modelo do Espaço Livre

O modelo de propagação do espaço livre prevê a potência recebida do Sinal utilizando a *Equação de Friss* descrita abaixo.

$$P_r(d) = \frac{(P_t G_t) G_r \lambda^2}{L (4\pi)^2 (d)^2} \quad (3.1)$$

Onde:

- $P_r(d)$ é a potência recebida em função do raio de separação $T - R$, em *watts* (W)
- P_t é a potência transmitida, em *watts* (W)
- G_t é o ganho da antena transmissora (adimensional)
- G_r é o ganho da antena receptora (adimensional)

Obs: As vezes, P_t e G_t podem ser dados diretamente em termos da *Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)*, onde $EIRP = P_t G_t$

- L é o fator de perda adicional do sistema (adimensional)

Quando $L = 1$ considera-se sem perda adicional, porém, com $L \neq 1$ são consideradas perdas além do espaço livre

- λ é o comprimento de onda do sinal, em metros (m)
- d é a distância de separação entre transmissor e receptor, em metros (m)

Com a equação do comprimento de onda dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

Onde:

- λ é o comprimento de onda, em metros (m)
- c é a constante da velocidade da luz no vácuo, em metros por segundo (m/s), onde $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- f é a frequência de operação, em hertz (Hz)

Em relação ao *EIRP*, vale ressaltar que, na prática geralmente usa-se a Effective Radiated Power (*ERP*), que indica a potência máxima (ou efetiva) transmitida comparada com uma antena do tipo dipolo de meia onda (em vez da antena isotrópica do *EIRP*) [5].

E além disso, a partir da potência da recebida, podemos encontrar também sua recíproca, a Perda de Percurso (*Path Loss*, *PL*) do espaço livre, em *dB*, através da Equação 3.3:

$$PL(d) = P_t - P_r(d) \quad (3.3)$$

Onde:

- $PL(d)$ é a perda de percurso em função do raio de separação $T - R$, em *dB*
- P_t é a potência transmitida ou a potência transmitida efetiva, em *dBm*
- $P_r(d)$ é a potência recebida em função do raio de separação $T - R$, em *dBm*

3.4.3.4 Modelos para Vegetação

São os modelos de propagação empíricos voltados para ambientes arborizados, que calculam a atenuação *Att* (em *dB*) [10], causada pela vegetação no sinal, em função da profundidade d (*Depth*, em metros) percorrida nessa vegetação, para determinadas frequências de operação f . De modo que, essa perda adicional é posteriormente é incrementada no modelo do Espaço Livre.

3.4.3.5 Modelo Weissberger

Este modelo é aplicado para profundidades de até 400 *m*, nas frequências de 230 *MHz* até 95 *GHz* [10], e é dado pela seguinte equação:

$$Att_{\text{Weis}}(d) = \begin{cases} 1.33 f^{0.284} d^{0.588}, & \text{para } 14 \text{ m} < d \leq 400 \text{ m} \\ 0.45 f^{0.284} d, & \text{para } 0 \text{ m} < d \leq 14 \text{ m} \end{cases} \quad (3.4)$$

Onde:

- f está em *GHz*

3.4.3.6 Modelo ITU-R

Este modelo, também conhecido como *Early ITU-R* [10], foi desenvolvido pelo *ITU-R*. É válido para as frequências de entre 200 *MHz* e 95 *GHz*, e profundidade de até 400 *m*.

$$Att_{ITU-R}(d) = 0.2 f^{0.3} d^{0.6}, \text{ para } d < 400 \text{ m} \quad (3.5)$$

Onde:

- f está em *MHz*

3.4.3.7 Modelo FITU-R

O *FITU-R* ou *Fitted ITU-R* é um modelo derivado do *ITU-R*, que passa a levar em consideração a presença ou não de folhas no cálculo da perda [10], dado pela seguinte expressão:

$$Att_{FITU-R}(d) = \begin{cases} 0.37 f^{0.18} d^{0.59}, & \text{sem folhas (out-of-leaf),} \\ 0.39 f^{0.39} d^{0.25}, & \text{com folhas (in-leaf),} \end{cases} \quad (3.6)$$

Onde:

- f está em *MHz*

De forma que, neste trabalho só foi considerada o cálculo da perda com a presença de folhas.

3.4.3.8 Modelo COST 235

O modelo *COST 235* também diferencia condições fenológicas no cálculo da perda, dado pela seguinte fórmula:

$$Att_{COST\ 235}(d) = \begin{cases} 26.6 f^{-0.2} d^{0.5}, & \text{sem folhas (out-of-leaf),} \\ 15.6 f^{-0.009} d^{0.26}, & \text{com folhas (in-leaf),} \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde:

- f está em *MHz*

De forma que, neste trabalho só foi considerada o cálculo da perda com a presença de folhas.

3.5 Traçado de Raios

A técnica do traçado de raios é uma das técnicas computacionais bastantes utilizadas nos modelo determinístico para as predições da propagação de rádio, que combina computação gráfica com cálculo de campos eletromagnéticos [17].

Ele faz a análise da propagação, associando as diferentes direções das frentes de onda, à raios - segmentos de reta, que partem de uma antena transmissora e incidem num cenário modelado, levando em consideração as diversas interações dos raios com os objetos presentes no ambiente - ou seja, os mecanismos de propagação, fazendo cálculos sobre elas. Conseguindo, dessa forma, tanto mapear de forma visual a propagação no ambiente quanto realizar a predição de parâmetros.

3.5.1 Cálculo dos Campos

Para o cálculo dos campos e a determinação de todos os caminhos possíveis entre os transmissor e o receptor, o *Ray Tracing* utiliza a teoria da Ótica Geométrica Moderna (*Geometrical Optics, GO*) e a Teoria Uniforme da Difração (*Uniform Theory of Diffraction, UTD*) [17].

3.5.2 Modelagem do Cenário

Na modelagem do cenário, a geometria dos objetos é criada e depois são configuradas suas características elétricas.

A geometria pode ser utilizada em 3, 2 e 2,5 dimensões [18].

3.5.2.1 Cenários 3D

A geometria tridimensional (3D) é a mais realista, usada em ambientes com grande detalhamento estrutura [18], onde os efeitos da propagação nelas são importantes e não podem ser desprezadas. Porém, em troca, oferecem um maior custo computacional.

3.5.2.2 Cenários 2D

A geometria bidimensional (2D) geralmente é aplicada em ambientes sem grande detalhamento estrutural, onde tanto os detalhes dos objetos quanto os efeitos de propagação da terceira dimensão podem ser desconsiderados do estudo, sem a perda de bons resultados [17]. Que reduz bastante o custo computacional e a complexidade da simulação.

3.5.2.3 Cenários 2,5D

Agora, a geometria 2,5D ou Pseudo 3D é uma adaptação do traçado de raios, que permite efetuar análises tridimensionais através de um ambiente 2D. Ela mantém alguns efeitos

da propagação no eixo z (3ª dimensão) que não podem ser desprezados, mas utilizando um algoritmo $2D$ e suas vantagens computacionais. Usada também em ambientes com grande detalhamento estrutural.

3.5.2.4 Características Elétricas

Além de existir o cenário e seus objetos, o traçado de raios também precisa da definição de suas características elétricas, dadas em termos de condutividade e permissividade. Pois estas, influenciam tanto na atenuação quanto na interação do raio com a superfície.

E para fins práticos, considera-se que um objeto possui apenas um material homogêneo, ou seja, apenas um conjunto de atributos elétricos. Mesmo sabendo que uma parede de concreto, por exemplo, é uma mistura de materiais [17].

Com isso, podemos destacar que no traçado de raios, é de vital importância que o cenário criado represente com boa fidelidade o ambiente real de estudo. Quanto mais realista ele for, mais confiável será a predição do algoritmo. Uma vez que, a posição, dimensões e características elétricas dos objetos influenciam totalmente na propagação do sinal.

3.5.3 Método SBR

No traçado de raios, um dos métodos bastante utilizados para rastrear os raios e encontrar os caminhos de propagação entre uma antena transmissora e uma receptora é o método de Disparar e Refletir (*Shooting and Bouncing, SBR*).

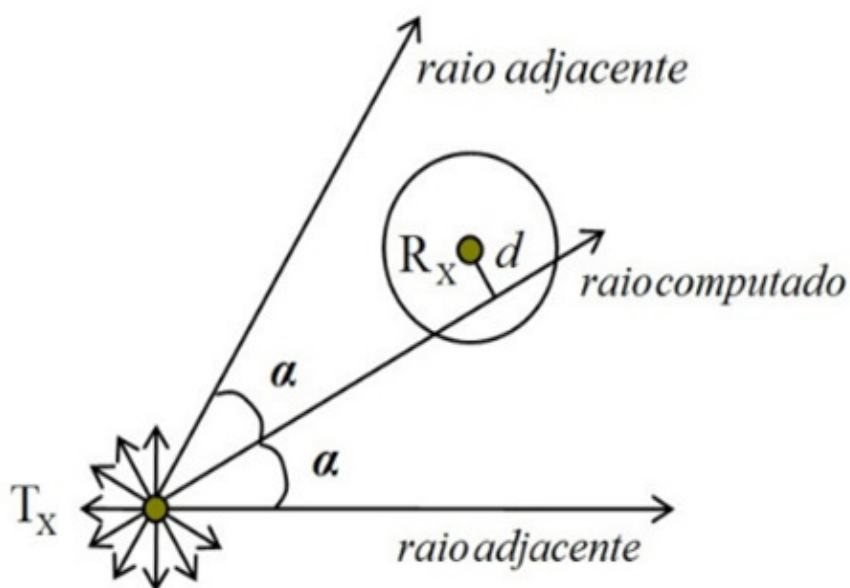
Essa técnica consiste no lançamento de raios de um transmissor - considerado como elemento pontual - no ambiente, em todas as direções, com um igual espaçamento angular α entre eles [17].

Esses raios vão se espalhando e interagindo pelo ambiente através dos fenômenos de propagação configurados - reflexão, transmissão (refração sem a mudança de direção) e outros (multipercursos). E conforme vão ocorrendo os efeitos, suas trajetórias e de seus descendentes vão sendo acompanhadas (rastreadas) e os campos calculados e recalculados, até atingirem alguma condição de parada ou descarte.

Os raios que atravessam a região de recepção do receptor vão sendo computados. Os raios que atingiram determinado número de intersecções dos mecanismos de propagação configurados, encerram seu trânsito. E os raios que apresentam direções impossíveis de recepção ou atingem um limiar mínimo de campo - quando sua contribuição torna-se desprezível, isto é, satisfaçam as condições de descarte, são desconsiderados dos cálculos.

A Figura 5 ilustra a forma como são lançados os raios a partir do transmissor e computados quando passam pela região de recepção de um receptor.

Figura 5 – Lançamento dos raios do método SBR



Fonte: [17]

Assim, ao fim do algoritmo, os caminhos entre o transmissor e receptor são encontrados e o campo total da recepção é calculado através soma da contribuição do campo de cada raio que atingiu essa zona.

Com isso, podemos notar que no método *SBR*, para analisar a recepção em qualquer parte do cenário, todos os raios devem necessariamente ser lançados. Pois não se sabe a priori seus destinos e qualquer um destes pode contribuir para o campo de recepção. É essa “obrigatoriedade” de lançamento de todos os raios que faz o método ser conhecido também como método da “força bruta” [17].

3.5.4 Validação do Método

Por ser tratar de um modelo computacional, uma simulação, uma aproximação da realidade, é necessário que este seja validado. Geralmente essa validação ocorre de forma estatística com base em medições feitas no sistema real que inspirou o modelo, sendo um *indicador-chave* para calibrar o algoritmo.

3.5.4.1 Raiz do Erro Médio Quadrático

Uma das métricas bastante utilizadas para tal é a Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error, RMSE*), que fornece um indicador de erro geral de um conjunto de dados, dado pela seguinte expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3.8)$$

Parâmetros:

- i : Índice que indica a n-ésima posição de um valor do conjunto de dados
- y_i : Conjunto dos dados das medições
- $\hat{y}_i$: Conjunto dos dados das simulações (predições)
- n : Último valor do conjunto de dados (nesse caso também representa o total de amostras)
- Σ : Operação de somatório

Onde, os dois conjuntos de dados analisados - da simulação e medição, devem conter a mesma quantidade de dados.

3.5.4.2 Desvio Padrão

O Desvio Padrão (*DP*) é uma outra forma de avaliação dos resultados. Ele é uma medida de dispersão, que ajuda a compreender a variabilidade de um conjunto de dados em relação à sua média [10], o quanto os dados estão concentrados (ou espalhados). E sua expressão é dada da seguinte forma:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.9)$$

Parâmetros:

- σ : Desvio Padrão do conjunto de dados
- i : Índice que indica a n-ésima posição de um valor do conjunto de dados
- x_i : Conjunto de dados analisado
- $\bar{x}$: Média aritmética dos valores desse conjunto de dados
- n : Último valor do conjunto de dados (nesse caso também representa o total de amostras)
- Σ : Operação de somatório

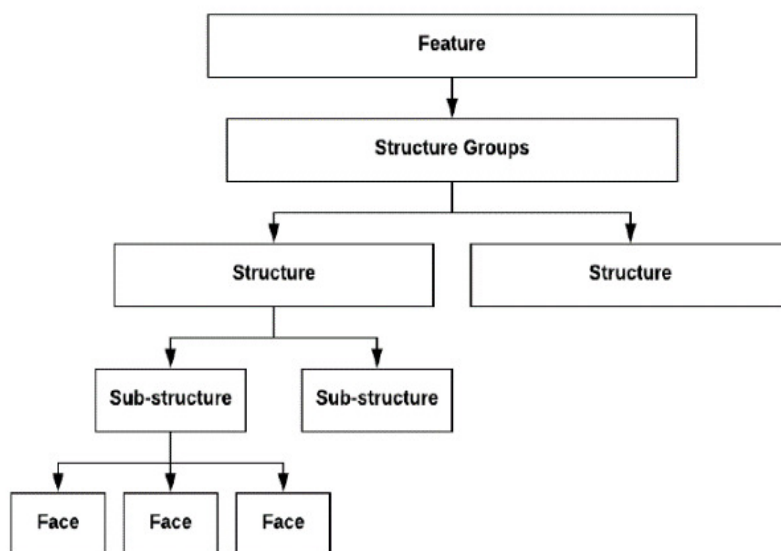
3.5.5 Wireless InSite

O *Wireless InSite* é um simulador proprietário bastante utilizado para aplicar o algoritmo do Traçado de Raios e realizar previsões de rádio propagação, possuindo uma gama de ferramentas para tal.

Nele é possível tanto modelar o cenário internamente, através da *Wireless InSite's editing tools*, quanto importá-lo de programas de modelagem gráficas externas, em formatos como *DXF*, *shapefile*, *DTED* and *USGS* [19].

Os objetos geométricos que irão compor o cenário são criados usando o recurso chamado de *features*. Cada *feature* é composta por uma hierarquia de subestruturas, seguindo o nível hierárquico ilustrado na Figura 6, que possuem um conjunto de faces, arestas e vértices [19].

Figura 6 – Estrutura das Features no Wireless InSite

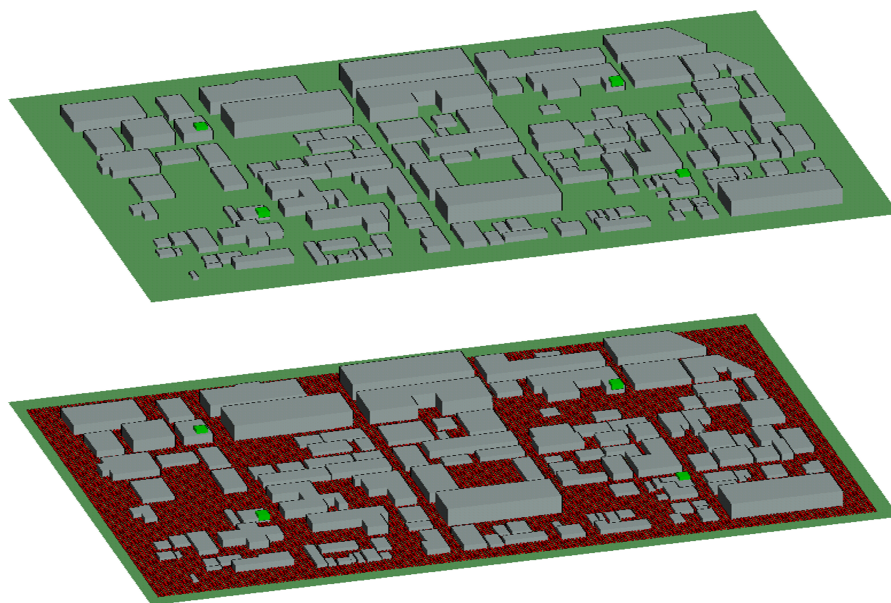


Fonte: [19]

Além disso, o Sistema de comunicações também pode ser plotado, em termos de transmissores e receptores, que possuem uma série de configurações de rádio disponíveis. Como a definição de formas de onda, definição de antenas, e os parâmetros dos dispositivos irradiantes utilizados, todos baseado na teoria de rádio e nos manuais de fabricantes.

Um exemplo de cenário contendo transmissores e receptores no *WI*, pode ser visto na Figura 7 abaixo:

Figura 7 – Cenário contendo transmissores (verde) e receptores (vermelho)



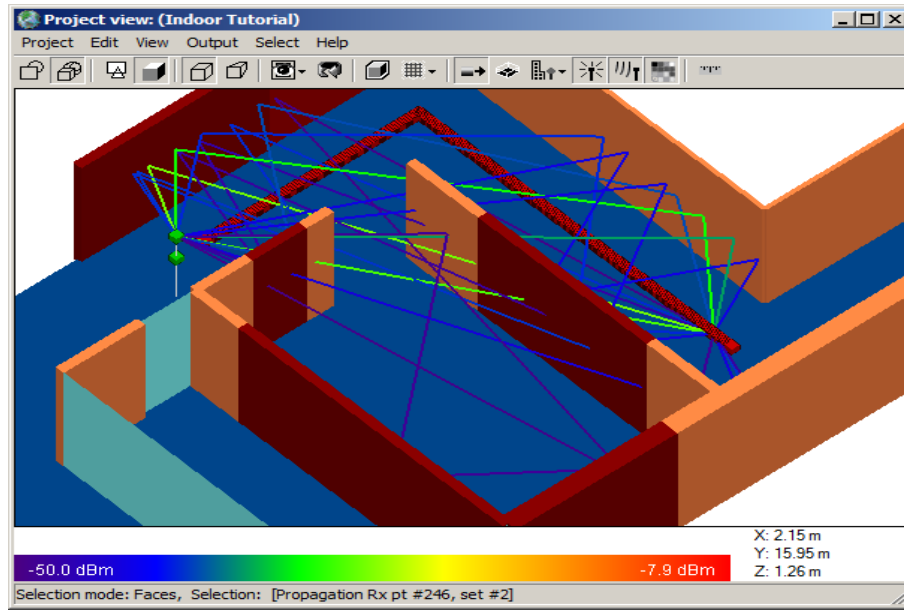
Fonte: [19]

Adicionado a esses fatores, no *InSite* também se define a parametrização da simulação [19], que é onde contem as configurações do algoritmo do traçado de raios. Sendo possível demarcar uma sub-região dentro do cenário para reproduzir o algoritmo; escolher um dos diversos modelo de propagação disponíveis do *RT*, como *X3D*, *Full 3D*, *Urban Canyon*, *Vertical Plane* [19], etc.; configurar quais e a quantidades de fenômenos que podem ocorrer na propagação dos raios; definir quais as saídas que a simulação irá reproduzir e outros. Configurações essas terão impactos tanto no custo computacional quanto na precisão de predição.

E por fim, a simulação é executada e os resultados escolhidos(saídas) são produzidos, podendo ser visualizados dentro do próprio simulador ou exportados para outros arquivos, como *txt* por exemplo, para serem analisados por outros *softwares*, como o *Matlab* por exemplo.

Um exemplo do rastreamento de raios do transmissor até o receptor com indicação visual do cálculo da potência recebida de cada raio é exibido na Figura a seguir:

Figura 8 – Percursos de Propagação dos Raios



Fonte: [19]

3.6 Algoritmo de Interseção Raio-Triângulo

O Algoritmo de *Möller-Trumbore*, também chamado de Interseção Raio-Triângulo (*Ray-Triangle Intersection*), resolve problemas de intersecção entre raios e triângulos, determinando se um raio intersecta uma face triangular [20].

Para isso, tem-se:

Um raio R com uma origem O e uma direção normalizada D é definido por

$$R(t) = O + tD \quad (3.10)$$

Uma face triangular definida por três vértices V_0 , V_1 e V_2 .

Uma distância t , do raio, da origem até o ponto de intersecção (até o plano em que o triângulo se encontra)

E um ponto dentro do triângulo $T(u, v)$, onde (u, v) são as coordenadas baricêntricas desse ponto, dado por

$$T(u, v) = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (3.11)$$

Assim, o calculo da intersecção entre o Raio $R(t)$ e o Triângulo $T(u, v)$ é equivalente a:

$$R(t) = T(u, v) \quad (3.12)$$

Expandindo em termos de seus componentes, temos

$$O + tD = (1 - u - v)V_0 + uV_1 + vV_2 \quad (3.13)$$

Rearranjando os termos e colocando na forma matricial, fica:

$$\begin{bmatrix} -D, & V_1 - V_0, & V_2 - V_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = O - V_0$$

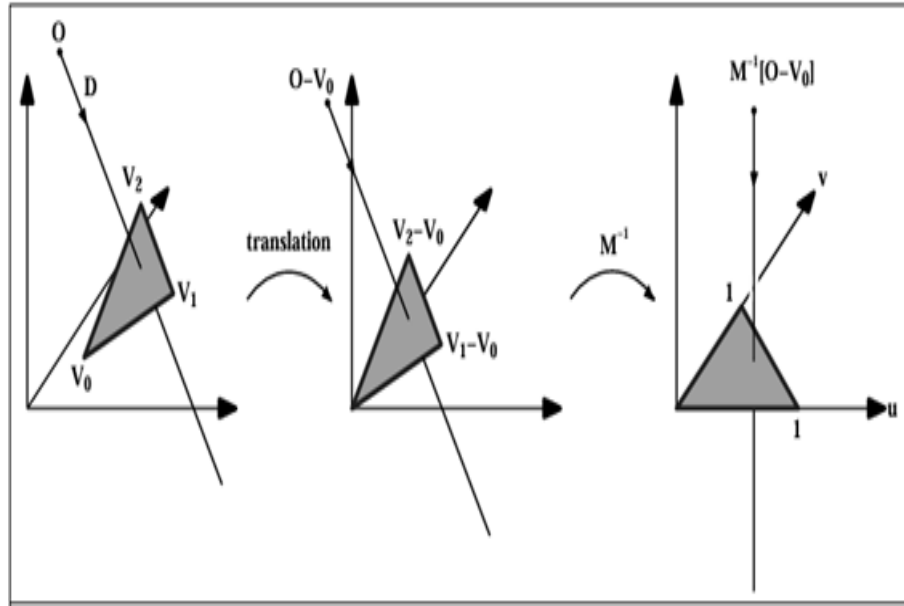
$$M \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = O - V_0 \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = M^{-1}[O - V_0]$$

Que corresponde geometricamente, primeiro, a uma translação do triângulo para a origem $(0, 0, 0)$ em relação a V_0 (não muda a forma, somente o referência), e segundo, a sua transformação em um triângulo unitário (normalizado) (operação de mudança de base) nos eixos y e z com a direção do raio alinhada com o eixo x , multiplicando por M^{-1} .

Essa interpretação geométrica é exibida na Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Transformação linear de Möller-Trumbore



Fonte: [20]

Agora, podemos encontrar o vetor $(t \ u \ v)^T$ produzido por essa transformação - que contem a distância até a intersecção e as coordenadas dessa intersecção - resolvendo esse sistema de equações linear acima, através da regra de *Cramer*.

Fazendo, $E_1 = V_1 - V_0$, $E_2 = V_2 - V_0$ e $T = O - V_0$, temos:

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{\det[-D, E_1, E_2]} \begin{bmatrix} \det[T, E_1, E_2] \\ \det[-D, T, E_2] \\ \det[-D, E_1, T] \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Da álgebra linear, sabemos que $|A, B, C| = -(A \times C) \cdot B = -(C \times B) \cdot A$ [20]. Então a Equação 3.15 pode, portanto, ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{(D \times E_2) \cdot E_1} \begin{bmatrix} (T \times E_1) \cdot E_2 \\ (D \times E_2) \cdot T \\ (T \times E_1) \cdot D \end{bmatrix} = \frac{1}{P \cdot E_1} \begin{bmatrix} Q \cdot E_2 \\ P \cdot T \\ Q \cdot D \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde $P = D \times E_2$ e $Q = T \times E_1$, sendo reutilizado esses fatores para acelerar os cálculos.

3.7 Considerações Finais

Em suma, com o advento e expansão da internet das coisas, as redes *LPWAN* foram criadas para atender todos os requisitos *IoT*, tendo as redes *LoRa/LoRaWAN* como uma de suas

principais formas de conectividade. E para estudar a implantação de Enlaces dessa conectividade, usa-se a ciência da propagação, através de medições e modelos de propagação como os empíricos e os determinísticos. Sendo que, esse último, está ganhando maior adesão nas últimas décadas, devido aos avanços da computação gráfica e do poder de processamento dos computadores. Os quais permitem utilizar algoritmos como o do traçado de raios e simuladores bem completos como o *Wireless InSite*, para realizar análises bem precisas e de forma simplificada, que antes desse advento, não seriam possíveis.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações Iniciais

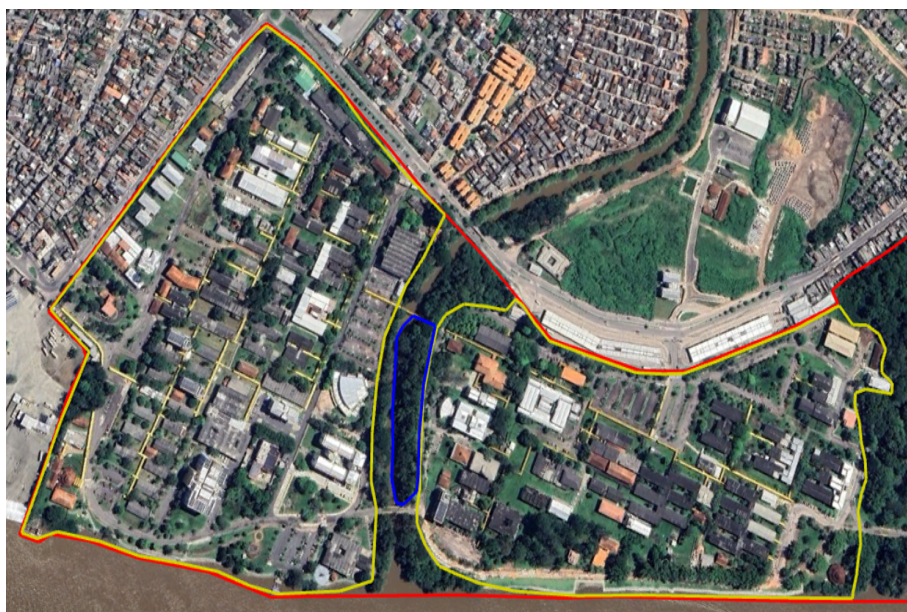
Neste capítulo, será descrito a metodologia utilizada na criação do modelo determinístico proposto. Que foi desenvolvido de forma computacional, através de simulação no *software Wireless InSite*, em conjunto com o *software Matlab*, onde foram feitos cálculos e análise de seus resultados.

4.2 Região de Estudo

O estudo foi conduzido no Bosque Camilo Viana, localizado na Universidade Federal do Pará entre os setores Básico e o Profissional, próximo às águas do Rio Guamá. Que é uma área arborizada presente em clima tropical, de bioma amazônico, com predomínio de árvores de grande porte, adaptado para passeios turísticos em seu interior - com troncos espaçados, mas com copa densa. Ocupando área de 9847 m^2 e perímetro de 533 m aproximadamente, com comprimento de 240 m , largura de 33 m e alturas (das árvores) que atingem 26 aproximadamente, segundo o aplicativo *Google Earth*.

A localização do bosque pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Imagem via satélite da região de estudo: a) Vermelho - UFPA; b) Amarelo - Setores Básico (à esquerda) e Profissional (à direita); c) Azul - Bosque Camilo Viana



Fonte: O Autor - Google Earth

4.3 Etapas da Simulação

A simulação foi feita no *software Wireless InSite* e se deu em três etapas principais: a criação do cenário do Bosque, a implantação da rede de telecomunicações e a definição da área de estudo. Com o *Setup*, baseado no trabalho feito em [10], que realizou medições nesse mesmo local, para estudo da propagação do sinal de um *rádio enlace LoRa*.

4.3.1 Modelagem do Cenário

Para modelar o bosque, foi proposto um cenário em três dimensões, composto de dois objetos, o terreno e a vegetação. O terreno foi considerado plano e a vegetação foi representada como um único bloco homogêneo de folhagem.

A construção 3D foi feita utilizando as próprias ferramentas de desenho do *WI*, sem necessidade de recorrer a programas externos.

Para tornar o modelo mais fidedigno com a realidade, o cenário foi criado sobre uma imagem com visão vertical do bosque, produzida via satélite. Que indicava visualmente sua área em dimensões reais, facilitando a modelagem. Sendo utilizada como se fosse a planta baixa de uma construção.

E não só isso, foi-lhe acrescida também mais um fator bastante peculiar, os pontos de transmissão e recepção de [10], que serão utilizados posteriormente na plotagem de rádio. Consolidando uma técnica inédita que renderá bons dividendos mais adiante nesse trabalho.

Pois bem, utilizar uma imagem como base para o cenário, é um dos recursos suportados pelo *WI* para modelagem gráfica. Porém, no caso deste trabalho, foi necessário aplicar algumas técnicas para fazê-la assumir corretamente as dimensões reais do ambiente exibido em seu desenho - O bosque Camilo Viana - e não ser apenas uma imagem de caráter ilustrativo.

Assim, os seguintes passos foram seguintes:

1. Foi criado um mapa personalizado do Bosque com as coordenadas do transmissor e receptores (a rota da medição) utilizando a ferramenta *My Maps* do *Google Maps*, importadas por um arquivo *.csv*;
2. Foi capturado uma imagem da tela (*Prinscreen*) desse mapa contendo o Bosque e os pontos das medições bem visíveis e localizados. Além da barra de escala (do *Google Maps*), iniciando exatamente na borda esquerda inferior da imagem do *print*, como consta na Figura 11 (o valor em metros que aparece ao lado da barra foi guardado);

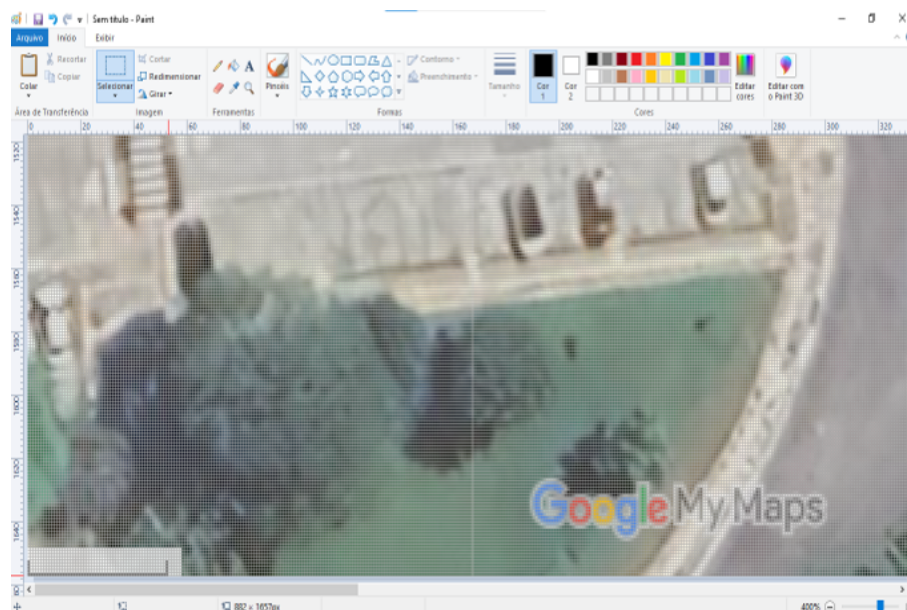
Figura 11 – PrintScreen do Bosque e a Rota de Medições



Fonte: O Autor - My Maps / Google Maps

3. Essa imagem foi importada no aplicativo *Paint-Windows*. Depois foi ativado a sua ferramenta régua e posicionado o cursor no final da barra escala, para encontrar, na parte superior da régua, o valor em *pixel* correspondente - marcado pelo traço vertical vermelho (também guardando este outro valor achado), conforme exibido na Figura 12.

Figura 12 – Ferramenta régua aplicada à barra de escala



Fonte: O Autor - Paint

O valor fornecido pelo *Google Maps* indica quantos metros no real o tamanho da barra equivale na imagem. Já a ferramenta de régua do *Paint* indica a quantidade de *pixels* que

ela equivale na imagem. Lendo-se os valores da seguinte maneira: "*n pixels na imagem, equivalem a x metros no real*";

4. Esses valores guardados, foram aplicados na fórmula da escala, para encontrar o fator de escala da imagem produzida pela captura de tela. Cujo, vai indicar quantos metros do real correspondem a cada *pixel* da imagem. Sendo calculado da seguinte maneira, conforme a Equação (4.1):

$$\text{Fator de escala} = \frac{\text{Tamanho real}}{\text{Tamanho no desenho}}$$

$$\text{Fator de escala} = \frac{10 \text{ m}}{53 \text{ px}}$$

$$\text{Fator de escala} = 0.18867924528301886792452830188679 \quad (4.1)$$

$$\text{Fator de escala} \approx 0.188$$

$$\therefore 1 \text{ px} \equiv 0.188 \text{ m}$$

Onde:

- *Tamanho real* é a medida do objeto no mundo real em metros;
 - *Tamanho no desenho* é a medida do tamanho real correspondente em pixel na imagem;
5. Por fim, calculado esse valor, a imagem é salva no formato de arquivo *.tiff* que possui uma alta definição de renderização.

Agora, a imagem está apta para ser importada corretamente para *InSide*.

Para isso, foi utilizado o sistema de coordenadas cartesiano e inserido o valor calculado do fator de escala nos campos *Pixel spacing X* e *Y*, com consta na Tabela 2. De forma que, no *Y* o valor é inserido negativo. Isso porque, o *WI* inverte a imagem verticalmente de forma automática. Então, ela foi invertida antecipadamente, através do sinal, e durante a importação, a operação automática retorna-a para a orientação normal.

Tabela 2 – Propriedades de importação da imagem

Configuração da Imagem do Cenário		
Cartesiano	Top left corner	Pixel spacing
X(m)	0 (padrão)	0.188
Y(m)	0 (padrão)	-0.188

Fonte: O Autor - Wireless InSite

Depois de importada a imagem, é feita a modelagem dos objetos.

Primeiro, o solo é criado, como uma *feature* do tipo *Terrain* - sendo a base, a referência posicional de todo o cenário.

Ele é criado em torno daquela figura. Dado que, ela é algo abstrato, ou seja, não influencia em calculo algum durante a execução do algoritmo, mas fica transparecendo todo o seu desenho através da superfície do Terreno - que é algo concreto para os cálculos do algoritmo.

Com isso, passa a assumir dimensões um pouco maiores que a ilustração, como mostra a Figura 13 a seguir.

Figura 13 – Objeto Terreno (criado em torno da imagem)



Fonte: O Autor - Wireless InSite

Assim, o terreno teve 321.516 m de comprimento e 175.816 m de largura aproximadamente, com formato geométrico retangular - um sólido 2D, estando contido no Plano XY.

Após a materialização geométrica do objeto, foram definidas as propriedades de seu material. Sendo definido o *Wet Earth* para o terreno, com modificações apenas nas suas características elétricas, sejam elas a condutividade e permissividade, com valores que indicam um solo úmido (dada a sua proximidade com riachos), apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do Material do Terreno

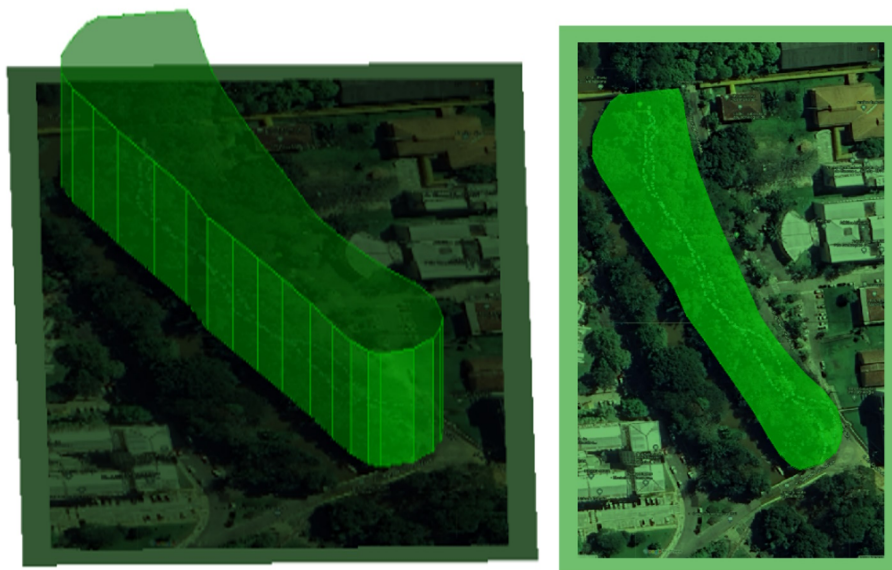
Material do Terreno		
Nome	Condutividade	Permissividade
Wet Earth	0.02 S/m	25

Fonte: O Autor

Agora, após estabelecido o terreno "ilustrado", ficou fácil e realista modelar a floresta bosque, de acordo com o modelo proposto.

Assim, a folhagem foi criada sobre o terreno, como uma *feature* do tipo *Foliage*, mantendo a mesma área e o local apontado pelo mapa. Adquirindo formato geométrico semelhante a um prisma, com base poligonal irregular - um sólido 3 *D*, contendo 44 Faces. E com a definição de uma altura homogênea de 26 *m* - a partir dos obtidos no *Google Earth*. Assumindo, o formato apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Objeto Folhagem: a) Vista oblíqua (lado esquerdo); b) Vista vertical (lado direito)



Fonte: O Autor - Wireless InSite

O material utilizado nela foi o *Dense deciduous forest, in Leaf*. Com definições feitas tanto nas suas características elétricas quanto na sua estrutura física, em termos de galhos e folhas, com os valores apresentados na Figura 15. Os quais, indicam vegetação de clima tropical (espessa e úmida), proximidade de riachos e uma boa distribuição da folhagem em seu interior (de acordo com a "organização" da vegetação observada no Camilo Viana).

Figura 15 – Propriedades do material da folhagem

Fonte: O Autor - Wireless InSite

Assim, após as definições dos valores, esse material gera uma atenuação no sinal, na polarização vertical (V), de 0.209173 dB/m . Significando que, a cada metro percorrido o raio vai sofrendo essa perda, mas de acumulativa. Mas atenção, somente foi considerada a perda da polarização vertical. Uma vez que, estão em função das antenas utilizadas neste trabalho, que será visto mais adiante.

Assim, o cenário foi consolidado, com tudo ao redor, constituindo o espaço livre.

4.3.2 Modelagem do Rádio Enlace

Após essa etapa, o *Rádio Enlace* é implantado.

Primeiro, foi definido a forma de onda que será utilizada pelas antenas. Ela baseia-se na rede de conexão *LoRa-IoT*, com parâmetros regionais definidos para território brasileiro, onde suas configurações estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros da Onda Portadora

Forma de Onda	
Tipo de Onda	Senoidal
Frequência da Portadora	915 MHz
Largura de Banda	125 KHz

Fonte: O Autor

Como a biblioteca do *Wireless InSite* não possui a modulação *LoRa*, foi utilizado o tipo de onda senoidal, por sua similaridade.

Depois, as antenas - que irão fornecer a conectividade no interior do Bosque por meio daquela onda portadora - foram determinadas.

Apenas um padrão de antena foi definido, tanto para a transmissão quanto para a recepção. Sendo ambas definidas com polarização vertical e do tipo *omnidirecional*. A Tabela 5 mostra o resumo dos valores configurados.

Tabela 5 – Configurações da Antena

Antena	
Tipo de Antena	Omnidirecional
Forma de Onda	Senoidal
Polarização	Vertical
Ganho (dB)	1
Perda na linha de transmissão (dB)	4
VSWR	1.5

Fonte: O autor

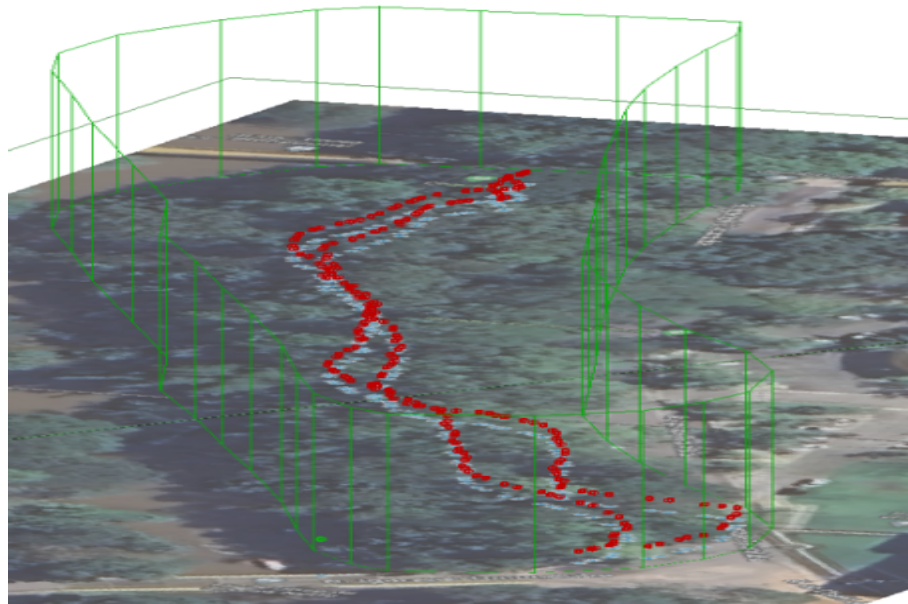
A partir disso, será criado os dispositivos transmissores e receptores que portarão essa antena. Eles serão posicionados no ambiente gráfico e configurados.

Pois bem, como dito anteriormente, a imagem base usada para criação do cenário também continha a localização dos pontos de transmissão e recepção.

Assim, a simulação contou com mais outro fator de realidade, a possibilidade de plotar os dispositivos do *enlace* nas mesmas posições das medições, preservando então, as mesmas distâncias de separação Transmissor-Receptor. Sendo uma preocupação importantíssima para os modelos determinísticos, uma vez que a posição dos elementos de rádio influenciam totalmente o percurso e portanto a recepção do sinal.

Assim, a topologia foi formada por um *Tx*, posicionado fora do bosque e em sua extremidade, a uma altura de 6 *m*, sendo plotado como ponto. E duzentos trinta e três *Rxs*, posicionados no interior do bosque, a uma altura de 2 *m*, sendo também plotados como pontos, significando uma rota de coleta do sinal, conforme ilustrado na Figura 16. Assim, a simulação teve exatamente, a mesma quantidade de recepções das medições - algo também vantajoso na hora de avaliar o erro da simulação futuramente.

Figura 16 – Topologia do Rádio Enlace: a) Verde: Transmissor, b) Vermelho: Receptores



Fonte: O Autor

O T_x foi setado com uma potência de transmissão de 5 dBm e o R_x com uma Figura de Ruído de 3 dB . Com o resumo de suas configurações exibidas nas Tabelas 6 e 7 respectivamente.

Tabela 6 – Parâmetros do Transmissor

Transmissor	
Polarização	Vertical (V)
Quantidade	1
Altura	6 m
Tipo de Plotagem	Ponto
Potência de Transmissão	5 dBm

Fonte: O autor

Tabela 7 – Parâmetros do Receptores

Receptores	
Polarização	Vertical (V)
Quantidade	233
Altura	2 m
Tipo de Plotagem	Ponto
Figura de Ruído	3 dB

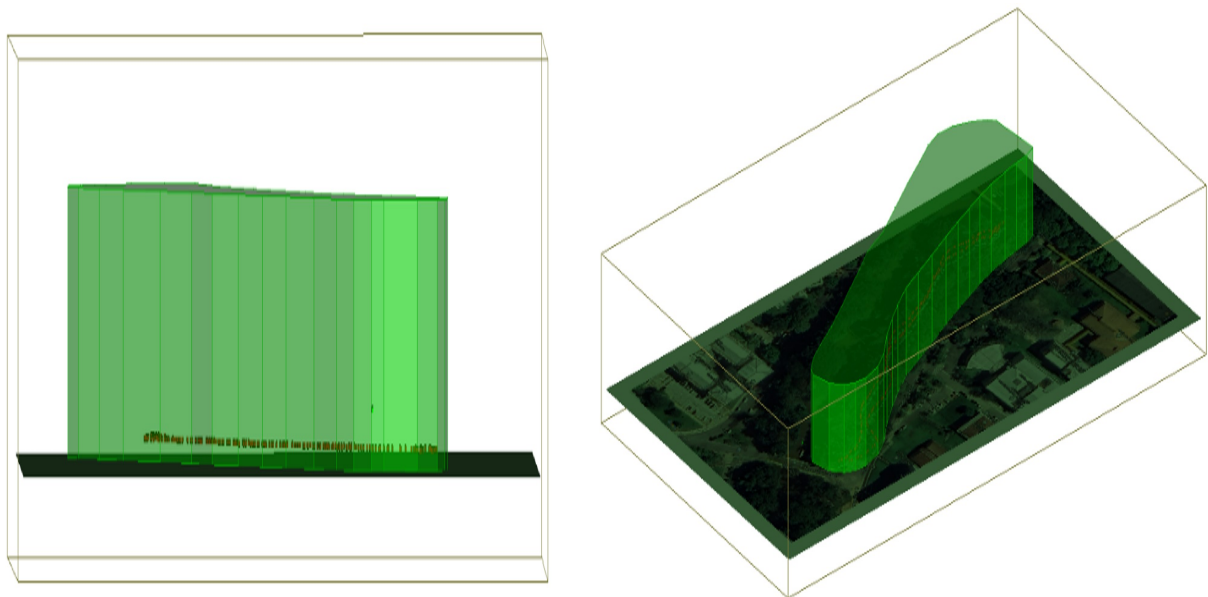
Fonte: O autor

4.3.3 Definição da Área de Estudo

Por fim, é definida a área de estudo da simulação. Ela é uma região de interesse, escolhida dentro do cenário, onde o sinal será propagado através do algoritmo do traçado de raios. Qualquer objeto ou parte dele, fora dessa membrana, não será levado em consideração durante a execução dos cálculos.

Assim, primeiro a área é demarcada. Sendo definida de forma a cobrir todo o cenário, pois ele inteiro, é relevante para a projeção dos raios, conforme é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Delimitação da Área de Estudo



Fonte: O Autor - Wireless InSite

Depois, o algoritmo do traçado de raios é configurado.

Nele, foi levado em consideração somente os mecanismos da reflexão e transmissão - a difração não foi utilizada. Dessa forma, foram setados 6 reflexões e 4 transmissões, com espaçamento angular entre os raios de 0.2° . Sendo suficientes para atingir todos os receptores bosque a dentro. Além disso, foram usados dois modelo de propagação, o *Full 3D* e o *X3D - Weissberg*. Com método *SBR* ou Força Bruta para "disparo" dos Raios.

O resumo da configuração da área de estudo é exibido na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades da Área de Estudo

Área de estudo	
Modelos de Propagação	Full 3D e X3D - Weissberg
Espaçamento dos Raios (°)	0.2
Reflexões	6
Transmissões	4
Difrações	0
Método do Traçado dos Raios	SBR

Fonte: O autor

E por fim, foram definidos as saídas que a área de estudo produzirá como resultado final da simulação, que serão utilizados para análise. Sendo analisado nesse trabalho somente a potência recebida e os percursos de propagação.

4.4 Tratamento das Medições

Além da simulação, foi necessário fazer alguns tratamentos nos dados das medições fornecidos por [10], para que pudessem ser comparados corretamente com os resultados da simulação. Sendo feitos no *software Matlab*.

4.4.1 Distância de Separação Tx-Rx

Primeiro, foi calculado a distância de separação entre o transmissor e os receptores por meio da equação de *Haversine*. Que leva em consideração a curvatura da terra e utiliza coordenadas geográficas para tal.

Assim, a distância de *Haversine*, adaptada para calculo computacional, é descrita na equação abaixo:

$$d_{haversine} = 2R \arctan \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right)}}{\sqrt{1 - \left(\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) - \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) \right)}} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

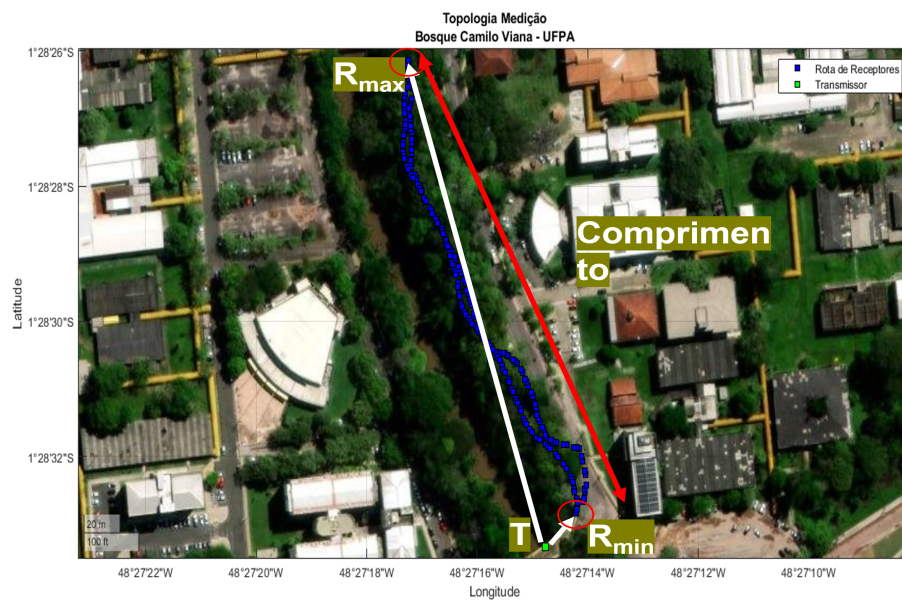
- $D_{haversine}$ é a distância de separação Tx-Rx, em metros
- r é o raio médio da Terra, aproximadamente 6371 km, em metros
- φ_1, θ_1 são a latitude e longitude do transmissor (Tx), em graus decimais

- φ_2, θ_2 são a latitude e longitude do receptor (Rx), em graus decimais

A latitude e longitude dos receptores foram fornecidas no conjunto de dados de [10], em graus decimais. Porém, as coordenadas do transmissor, foram obtidas no *Google Earth*, plotando o ponto correspondente no mapa e depois convertendo-as para *Graus decimais*, já que estava em *Graus, minutos e segundos*.

Com isso, foi possível calcular também algumas métricas importantes da rota da medição, presentes na Tabela 9 e visíveis na Figura 18. Que são usadas inclusive para validar a técnica de usar a imagem como base do cenário, coincidindo com as dimensões geradas pelo *WI*.

Figura 18 – Rota da medição a) Posicionamento de Tx e Rx b) Métricas da Rota



Fonte: O Autor - Matlab

Tabela 9 – Métricas da Rota de Medição

Rota da Medição	
Comprimento	211.91 m
Distância de separação T – R _{min}	23 m
Distância de separação T – R _{max}	234.91 m

Fonte: O autor

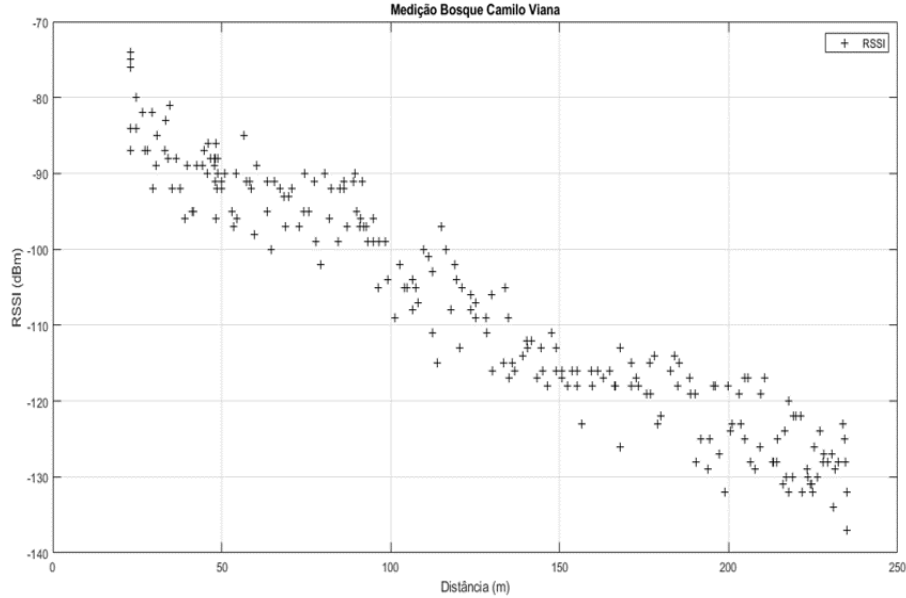
4.4.2 RSSI e ESP

Depois, geradas as distâncias entre o transmissor e os receptores, foi possível estabelecer a relação *RSSI x Distância de Separação*.

O *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* foi o valor coletado nas medições, que indica a intensidade do sinal naqueles pontos de aferição. Assim, com aquela relação estabelecida,

podemos analisar com se dá a variação desse valor recebido, à medida que o ponto de recepção se afasta do transmissor, rumo ao interior do bosque, plotada na Figura 19 abaixo.

Figura 19 – RSSI x Distância



Fonte: O Autor - Matlab

Só que, o *RSSI* - da medição, não equivale à potência recebida - da simulação. Isso porque, o valor gerado por ele leva em consideração, além da potência recebida do sinal, alguns outros fatores do canal. Então, o indicador medido foi convertido para a Potência Recebida Estimada, *PRE (Expected Signal Power, ESP)*, que esse sim, equivalente à métrica da *PR*, permitindo a correta comparação entre essas duas grandezas. Onde, ambos (em *dBm*) são analisados em relação à distância (em *metros*) de *Tx* - daí a necessidade primária de encontra-la.

E para isso, foi utilizado seguinte Fórmula , fornecida por [10]:

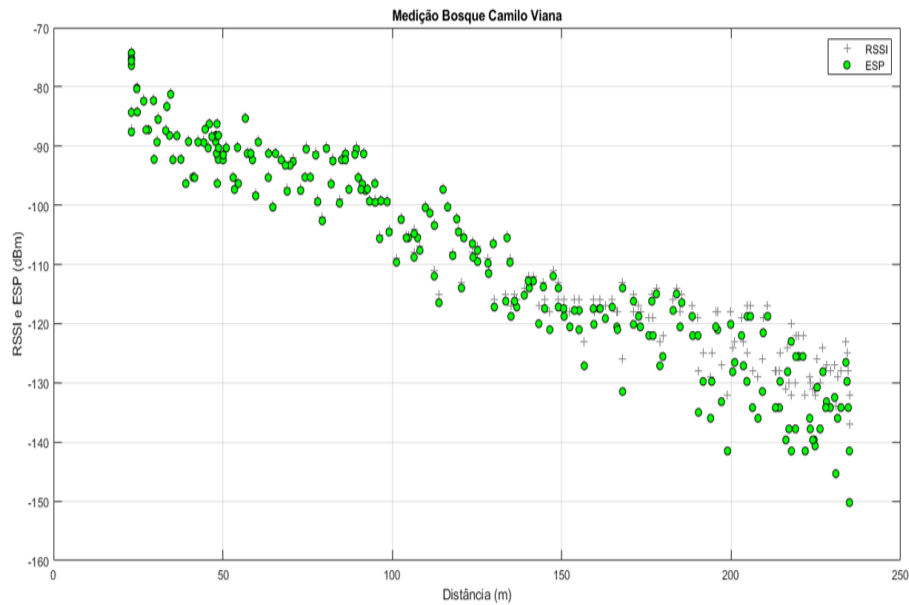
$$ESP = RSSI + SNR - 10 \cdot \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{SNR}{10}} \right) \quad (4.3)$$

Onde:

- $ESP_{(dBm)}$ é o vetor da Potência Esperada do Sinal, em dBm
- $RSSI_{(dBm)}$ é o vetor da Indicação de Intensidade do Sinal Recebido, em dBm
- $SNR_{(dB)}$ é o vetor da Razão Sinal-Ruído, em dB (fornecido nos dados das medições)

Então, o *ESP* apresentou a seguinte variação de valores em relação ao *RSSI* no gráfico abaixo:

Figura 20 – RSSI e ESP x Distância



Fonte: O Autor - Matlab

Então, agora, os dados das medições estão equivalentes e prontos para serem analisados em conjunto com as simulações, sendo a referência para os resultados do modelo.

4.5 Modelos Empíricos para Vegetação

Além da comparação dos resultados da simulação com as medições, houve também a comparação com os dos modelos de propagação empíricos. Sendo eles, o modelo de *Weissberger*, o modelo *ITU-R*, o modelo *FITTED ITU-R (FITU-R)* e o modelo *COST 235*, todos voltados para ambientes de vegetação, dado a região (arborizada) estudada neste trabalho - Bosque Camilo Viana.

4.5.1 Potência Recebida

O parâmetro analisado desses modelos, logicamente foi a *PR* - equivalente à *PR* da simulação. Porém, eles só fornecem por padrão, o valor da perda que a vegetação causa no sinal *Att* ao adentrar na floresta.

Então, para chegar lá, primeiro calcula-se essa perda pelas suas equações constituintes. Depois, acrescenta-se esse valor na equação de *Friss* - que gera o valor da potência recebida do sinal na propagação do espaço livre - no parâmetro *L*. Indicando que, além da perda natural da propagação no espaço livre ($L = 1$), ouve também uma perda adicional, da propagação na vegetação. Assim, consegue-se obter qual a *PR* para cada um desses modelos de vegetação.

Adaptando a Equação 3.1 da seguinte forma:

$$P_r = \frac{(P_t G_t) G_r}{L_{vegetacao}} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 (d)^2} \quad (4.4)$$

Como o valor fornecido pelos modelos de vegetação são calculados em dB , convertermos a Equação 4.4 de escala linear para a escala logarítmica, gerando a seguinte expressão:

$$P_r = ERP + G_r - L_{vegetacao} + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

- P_r é a potência recebida em dBm
- ERP é a potência transmitida efetiva, fornecida por [10], em dbm
- G_r é o ganho da antena receptora em dBi
- $L_{vegetacao}$ é a atenuação adicional causada pela vegetação em dB
- λ é o comprimento de onda do sinal, em metros (m)
- d é a distância de separação entre transmissor e receptor, em metros (m)

E com a potência recebida calculada, a perda de percurso também foi calculada.

4.5.2 Profundidade

Porém, antes de gerar a perda dos modelos empíricos, foi necessário calcular a profundidade percorrida do sinal no interior do bosque (de acordo com sua equação).

Como o objeto de folhagem desenhado no *WI* assumiu as dimensões volumétricas do bosque com boa precisão, ele foi utilizado como referência para esse cálculo (mais um dividendo gerado pela técnica da "planta baixa").

Para isso, foram importadas no *Matlab* as coordenadas cartesianas x , y , z do transmissor, dos receptores e do Objeto. As do Tx , foram obtidas nas propriedades do transmissor (na *interface* do aplicativo). As do Rx , foram obtidas num arquivo de saída (qualquer) da área de estudo utilizando o modelo de propagação *X3D*. E as da folhagem, foram obtidas pelo seu arquivo criado pelo *WI*, com extensão *.veg* - Onde as coordenadas referem-se aos vértices que compõem as suas faces.

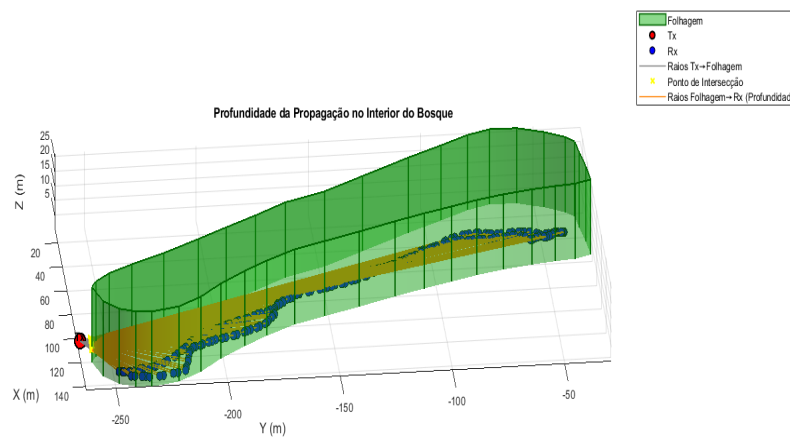
Depois, o objeto *3D* foi reconstruído usando apenas os vértices da face superior e as alturas da base e do topo. Logo após, todas as faces (laterais, base e topo) foram transformadas para serem compostas de um conjunto de faces triangulares cada. Onde a base e topo foram

constituídas de leques triangulares - dada a sua forma original de um polígono irregular, e as laterais constituídas de dois triângulos - dada a sua forma original de um retângulo.

Assim, em seguida, é calculado os vetores do transmissor até os receptores (Raio $Tx \rightarrow Rx$), de forma normalizada. E faz-se o teste de intersecção de cada raio, para todas as faces triangulares (com três vértices), usando o algoritmo de Intersecção Raio-Triângulo [20].

Quando encontrada a intersecção (dado que todos os receptores estão dentro da folhagem e, sempre terá uma e somente uma intersecção), é calculada então a distância (Euclidiana) entre esse ponto de entrada na floresta e o ponto de recepção (Raio *Ponto de Entrada* $\rightarrow Rx$), gerando as profundidades correspondentes, como mostra a Figura 21 a seguir - onde, foi possível plotar no *Matlab*, o Bosque 3D e o enlace de rádio criados no *WI* para visualização dos resultados calculados da profundidade.

Figura 21 – Profundidade do Receptor no Bosque 3D



Fonte: O Autor - Matlab

E após isso, os valores da perda dos modelos de propagação empíricos foram calculados normalmente.

4.6 Avaliação da simulação

Ao fim de tudo, os resultados das simulações foram analisados utilizando a métrica do *RMSE*, que mensurou estatisticamente a discrepância entre os resultados preditos da *PR* pelo modelo determinístico e os resultados esperados da *ESP* coletado nas medições, que são os valores de referência para o comportamento final da simulação. Avaliando o quão próximo o

modelo está das medições reais, o quanto ele segue a curva medida, o quão preciso ele é em seus cálculos.

Como o modelo proposto usou a mesma quantidade de pontos de coleta da medição, o *RMSE* foi calculado normalmente sem a necessidade de interpolação no conjunto de dados da simulação - sendo outro bônus acrescido por acrescentar os *Rxs* na imagem base do cenário e não deixar exibir somente o mapa da região para modelagem.

Com isso, o valor calculado pelo *RMSE* foi utilizado como um norte para calibrar a simulação. Fazendo-se isso, através de ajustes nos parâmetros relevantes - de acordo com a teoria da literatura, com objetivo de diminuir ao máximo esse indicador de erro e/ou deixá-lo dentro de uma faixa de tolerância, validando a predição do modelo proposto nesse trabalho.

Porém, além disso, o *RMSE* também foi calculado para a predição dos modelos empíricos, de forma a analisar quais dos modelos - o proposto nesse trabalho e esses da vegetação, obtiveram os melhores resultados.

Mas não só o *RMSE*, o desvio padrão também foi mensurado para avaliação da dispersão dos resultados obtidos deste e dos modelos empíricos de vegetação em relação à dispersão das medições. No qual, indica o quanto é considerado da variabilidade do canal em suas predições.

4.7 Considerações Finais

Em síntese, criado o cenário, implantado o enlace de rádio e definido a área de estudo, a simulação é executada e gerará os resultados do algoritmo do traçado de radio para a predição da potência recebida do sinal (predição do modelo determinístico).

Estes por sua vez, serão comparados com os valores de *ESP* das medições, juntamente com as predições geradas pelos modelos empíricos relevantes para ambientes vegetação, com a finalidade de calibrar e validar o modelo proposto, através da métrica do *RMSE*.

5 RESULTADOS

5.1 Considerações Iniciais

Nesse capítulo, serão mostrados os resultados alcançados pelo modelo determinístico proposto e comparados com os resultados de previsões usuais da literatura, todos eles em função das medições feitas por [10], além da análise do algoritmo do traçado de raios.

5.2 Resultados da Simulação

Como visto no capítulo anterior, os resultados da simulação foram produzidos de acordo com as saídas configuradas na Área de Estudo. Assim, foram definidas como saídas, a potência recebida e os percursos de propagação, que são os parâmetros chave da previsão do modelo determinístico deste trabalho.

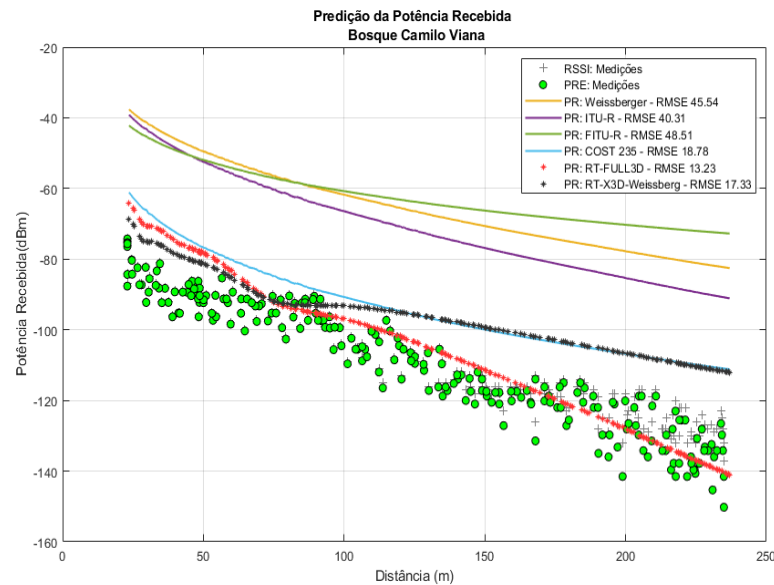
E para essas previsões, tanto a configuração do algoritmo do traçado de raios quanto a definição das propriedades dos materiais dos objetos que compõem da área de estudo, foram extremamente relevantes para o cálculo de seus valores.

Assim, em relação ao material dos objetos, foram mantidos os mesmo valores informados no capítulo anterior. E em relação ao traçado de raios, foram utilizados dois modelos de propagação diferentes, o *Full 3D* e o *X3D-Weissberger*, ambos com as mesmas configurações do traçado de raios, também vista no capítulo anterior - a lembrar: 6 Reflexões, 4 Transmissões, Espaçamento Angular de 0.2° e o Método *SBR* de disparo dos raios. Ocasionalmente, uma análise da simulação sob duas óticas de previsão, em função desses modelos do *RT* escolhidos.

5.2.1 Potência Recebida

Pois bem, a previsão da potência recebida na simulação apresentou os seguintes resultados exibidos na Figura 22:

Figura 22 – Predição da Potência Recebida da Simulação



Fonte: O Autor - Matlab

Nesse gráfico, constam os resultados obtidos para a potência recebida da simulação, representados pelo marcador asterisco, do Modelo *Full 3D* - de vermelho - e *X3D-Weissberger* - de preto. Além deles, há também os valores coletados do *RSSI* das medições - sinal de adição da cor cinza - e sua conversão para *PRE* - círculo verde, que são os valores de referência da predição. E por fim, tem-se os valores da potência recebida dos modelos de propagação empíricos para vegetação, representados pelas linhas contínuas, do modelo de *Weissberger* - de laranja, do *ITU-R* - de roxo, do *FITU-R* - de verde - e do *COST 235*.

Nele, podemos observar que o modelo do traçado de raios *Full 3D* foi o qual apresentou a melhor predição, com o menor *RMSE* de 13.23 e a curva mais ajustada com a *PRE* - tendência decrescente retilínea. Sendo isso alcançado com uma atenuação da vegetação de 0.209173 dB/m (para a polarização vertical) do material do objeto de folhagem.

Quanto ao modelo *XD3-Weissberger*, observa-se que ele apresentou uma predição um pouco próxima da *PRE*. Mas vale ressaltar que, diferente do *Full 3D*, ele não levou em consideração as propriedades do material definidas na modelagem dos objetos - como por exemplo a atenuação da folhagem de 0.209173 dB/m - para o cálculo da potência recebida, efetuando o cálculo de forma automática e proprietária. Dessa forma, percebe-se que sua predição iniciou com valores melhores que o modelo *Full 3D*, porém a partir de cerca de 75 m de distância do transmissor, dentro do bosque, sua curva apresenta uma inclinação mais suave, e não acentuada como a do *Full*. Fazendo com que fique fora do intervalo esperado nessas distâncias, indicando perdas menores do que a *PRE* e o *Full 3D*. Obtendo com isso, um *RMSE* de 17.33, indicando uma taxa de erro maior que o do *Full*.

Além disso, observa-se que, a predição do modelo *XD3-Weissberger* foi bastante equi-

valente com a predição do modelo *COST 235*, tanto é que, ele apresentou um *RMSE* de 18.78, sendo uma diferença bem pequena em relação ao *X3D*.

Com isso, pode-se dizer então que dentre os quatro modelos empíricos, o modelo *COST* foi o que melhor apresentou a predição, com o menor *RMSE*. Tendo os outros três, valores de *RMSE* bastante altos, acima de 40, sendo uma diferença bastante considerável.

Em relação ao desvio padrão, o das medições, apresentou um valor relativamente alto de 18.13, devido a alta variabilidade do canal de vegetação do bosque. Dentre todos os modelos de propagação, o *Full 3D* foi o qual apresentou o maior valor, com DP de 22.92 - maior que o das medições, ultrapassando a variabilidade real, mesmo com um cenário de pouco detalhamento do ambiente (fazendo jus a sua curva de tendência mais íngreme). Já o modelo *FITU-R*, foi o qual obteve o menor valor, um DP de 9.05, não capturando bem toda a aleatoriedade do canal, subestimando-a (dada a sua curva mais suave).

Dentre os modelos do traçado de raios, o modelo *XD3-Weissberger* refletiu menos essa variação das medições, com DP de 12.12. E dentre os modelos empíricos, os modelos de *Weissberger*, com DP de 13.51, do *ITU-R*, com DP de 15.66, e do *COST 235*, com DP de 14.79, obtiveram valores próximos, um pouco próximos das medições.

Os valores de *RMSE* e do *DP* dos modelos de propagação analisados encontram-se na Tabela 10:

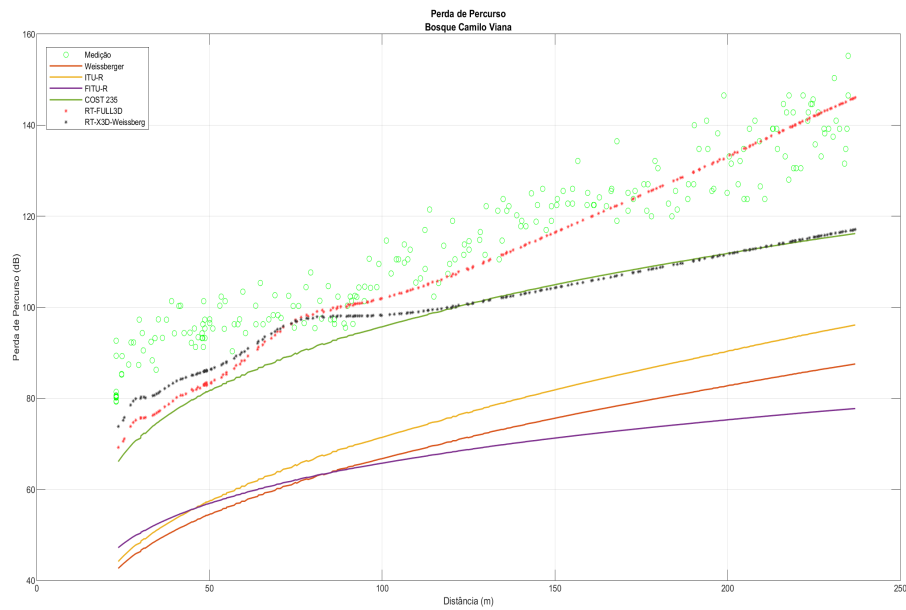
Tabela 10 – Comparação dos valores de *RMSE* e *DP* dos modelos analisados

Resultados Obtidos		
Modelo de Propagação	<i>RMSE</i>	<i>DP</i>
Weissberger	45.54	13.51
ITU-R	40.31	15.66
FITU-R	48.51	9.05
COST 235	18.78	14.79
Full 3D	13.23	22.92
XD3-Weissberger	17.33	12.12
Medição	-	18.13

Fonte: O autor

E por fim, a perda de percurso é exibida na Figura 23, indicando a atenuação sofrida pelo sinal para poder atingir a potência recebida calculada acima, que cresce com a distância:

Figura 23 – Perda de Percurso

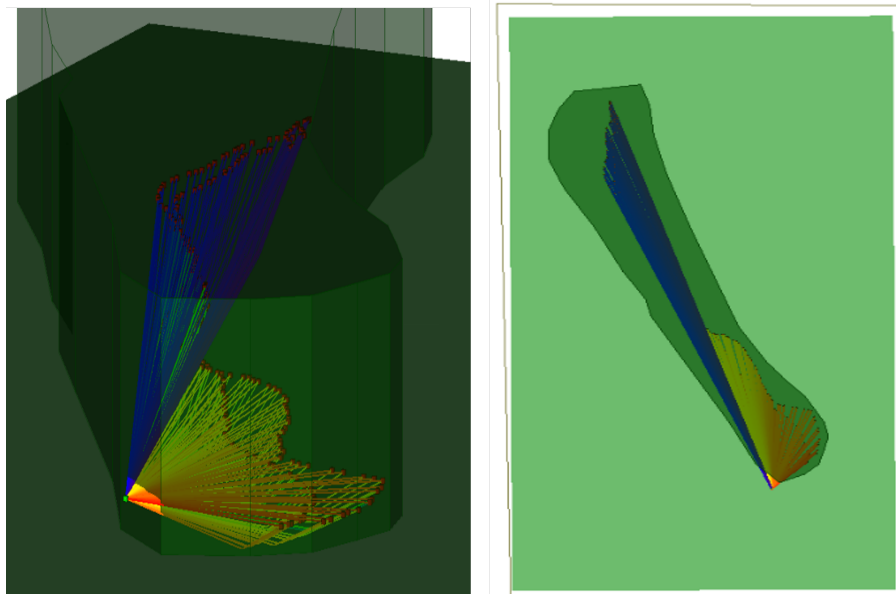


Fonte: O Autor - Matlab

5.2.2 Percursos de Propagação

Analisando agora a segunda saída da área de estudo, podemos observar visualmente quais foram os caminhos entre o transmissor e os receptores por onde os raios se propagaram, sendo plotados na Figura 24 a seguir.

Figura 24 – Percursos de Propagação



Fonte: O Autor - Wireless InSite

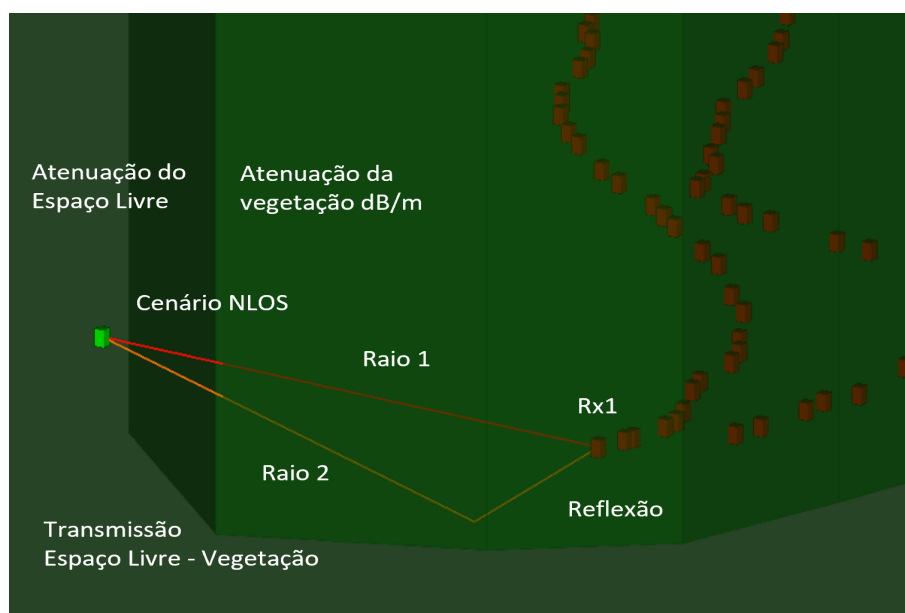
Nela podemos observar que o transmissor, que está fora da folhagem, dispara raios para

todos os receptores, que estão dentro da folhagem, indicando que há área de cobertura para todo o Bosque 3 D.

Além disso, é notado também que, em um ponto de recepção há mais de um raio incidindo sobre ele, indicando a propagação *multipercurso*. Isso porque, o transmissor e os receptores experimentam um cenário Sem Linha de Visada (*Non-Line of Sight, NLoS*), onde o objeto folhagem é a obstrução. Assim, só é possível chegar raio nos *Rxs* por meio da propagação indireta, via fenômenos de propagação (definidos na área de estudo), não havendo portanto raio direto.

Como o cenário possui apenas uma obstrução total e o solo, foi observado ao longo de toda a rota de recepção, apenas dois percursos de propagação para cada *Rx*, um, dado através do fenômeno de transmissão e o outro da reflexão. Podendo serem vistos na Figura 25, que foca somente dos raios que atingem o *Rx1*, receptor mais próximo do transmissor.

Figura 25 – Mecanismos da propagação em *Rx1*

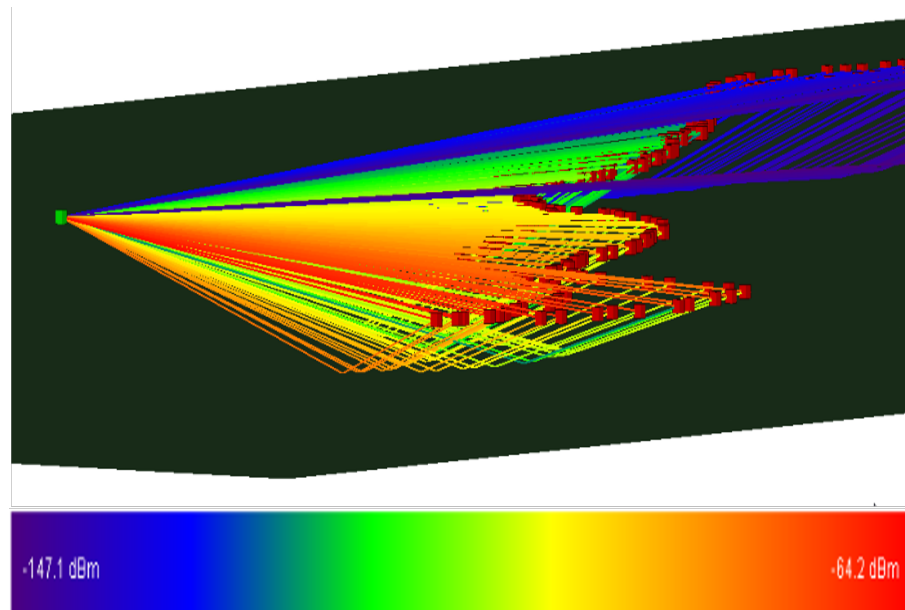


Fonte: O Autor - Wireless InSite

Nele, podemos observar dois raios partindo do transmissor e atravessando a folhagem, um deles segue diretamente para o *Rx1* sem mudar sua trajetória, e o outro ricocheteia no solo para poder atingir *Rx1*. À aquele, ocorre somente o mecanismo de transmissão, e à esse, ocorre primeiro a transmissão e depois a reflexão. Indicando que os valores configurados da reflexão (6) e transmissão (4), foram suficientes para que o raio pudesse fazer todos os caminhos até *Rx*.

E por fim, e não menos importante, pode-se observar nas Figuras 24 e 25 uma variação de cor dos raios, como uma espécie de mapa de calor, só que, ao invés da temperatura, a potência recebida é indicada pela variação da cor, conforme exibida na Figura 26 abaixo.

Figura 26 – Variação da Potência em cada raio recebido



Fonte: O Autor - Wireless InSite

As cores que tendem para o tom azulado (frio) indicam uma grande atenuação na potência, ou seja, um sinal recebido bem fraco. Enquanto que as cores que tendem para o tom avermelhado, indicam pouca atenuação, ou seja, um sinal recebido bem forte.

Assim, ressaltamos que, os raios mais compridos que chegam nos receptores mais afastados, sofreram bastante atenuação (azulados). Enquanto que, os raios mais curtos que chegam nos receptores mais próximos, sofreram pouca atenuação (avermelhados). Atenuação essa influenciada pela distância de separação Transmissor-Receptor ($T-R$), comprovada pela tendência decrescente da PR da simulação em 22.

E além disso, é constado também que os raios que obtiveram somente uma transmissão possuem cores mais a direita da faixa do "mapa de calor" dos quais obtiveram uma transmissão e uma reflexão. Indicando que, quanto mais fenômenos ocorrem em um raio para poder atingir o receptor, mais atenuação ocorre.

5.2.3 Complexidade Computacional

Por fim, foi avaliado o tempo de execução como custo computacional do algoritmo do Traçado de Raios - SBR, executado por meio do *software Wireless InSite*.

Utilizando 6 R e 4 T , o modelo *Full 3D* durou 6 minutos e 35 segundos aproximadamente e o modelo *X3D-Weissberger* durou 30 segundos aproximadamente, como mostra a Tabela 11. Sendo tempos de execução bastantes viáveis, considerando a simulação com um cenário de baixa complexidade geométrica, seja pela quantidade de objetos no cenário, suas dimensões e a quantidade de receptores e transmissores.

Tabela 11 – Tempos de execução dos algoritmos do traçado de raio

Custo computacional do RT		
Modelo do RT	Configuração	Tempo de Execução
Full 3D	6R 4T	6 min e 35 s
XD3-Weissberger	6R 4T	30 s

Fonte: O autor

A simulação foi executada a partir de uma máquina virtual com sistema operacional *Windows 10 Pro*, utilizando 32 GB de RAM de 64 GB disponível e 1 processador *Intel Xeon Silver 4210* de 2 processadores disponíveis na máquina física.

5.3 Considerações Finais

Em suma, o modelo determinístico proposto baseado no traçado de raios, permite-nos analisar não somente os valores de predição, mas também como se dá a propagação do sinal na região de interesse, permitindo um estudo mais aprofundado em comparação com os modelos empíricos tradicionais.

6 CONCLUSÃO

Em suma, o modelo de propagação determinístico baseado no traçado de raios, por meio do simulador *Wireless InSite*, criado para realizar a predição da potência recebida do sinal, utilizando rede *LoRa-IoT*, no bosque Camilo Viana, considerando-o como um único sólido de vegetação e material característico de bioma amazônico de clima tropical, mostrou-se bem eficaz em seus cálculos.

Ele gerou melhores predições que os modelos de propagação empíricos para vegetação comumente utilizados - o *ITU-R*, o *FITU-R*, o *Weissberger* e o *COST 235* - com o menores valores de *RMSE*, tanto do *Full 3D* quanto do *X3D-Weissberger*, indicando uma maior versatilidade das técnicas que envolvem computação gráfica do que as técnicas estatísticas tradicionais para estudo da propagação. Porém, em relação ao desvio padrão, somente o *Full 3D* apresentou um bom valor, junto com o *ITU-R* (sendo o *ITU-R* o mais próximo do DP das medições), conseguindo também representar satisfatoriamente a variabilidade do canal do bosque, além de ter a previsão mais próxima.

Além disso, pode-se notar também que, a preservação de diversos aspectos tanto da região de estudo quanto das medições - sejam eles as dimensões da área do bosque, as posições e quantidades dos dispositivos de rádio utilizados, algumas de suas configurações e outras - contribuíram bastante com esses bons resultados alcançados, dando maior confiabilidade para a simulação.

Em relação aos dois modelos do traçado de raios que geraram as saída do *WI*, observou-se que o modelo *Full 3D* foi o qual mais se adequou aos dados medidos em relação ao modelo *X3D-Weissberger*, confirmado isso pelo seu menor indicador de erro (*RMSE*). Se dando ao fato principalmente por conta da influência das propriedades do material no calculo da potência recebida. Isso porém, a um custo de tempo muito maior que o modelo do *X3D*. E além disso, o *Full 3D* também considerou uma variabilidade do canal de vegetação do bosque melhor que o modelo *X3D*, tendo um desvio padrão mais próximo das medições.

Assim, foi notório que a simulação apresentou um comportamento dentro do esperado, com indicador de erro dentro da faixa desejável, um desvio padrão relativamente próximo ao e um baixo tempo de execução, sendo então validada, demonstrando a qualidade e precisão do *software Wireless InSite* e do algoritmo do traçado de raios para resolver problemas de rádio frequência.

Por conseguinte, podemos destacar que este estudo corroborou com os seguintes tópicos:

- A modelagem de objetos 3 D no *Wireless InSite* considerando suas dimensões realísticas

- A análise determinística do comportamento de redes *LoRa* em ambiente *outdoor* de vegetação amazônica tropical
- A implantação de um *Smart Campus* na UFPA
- O levantamento de características elétricas das árvores que compõem o bosque Camilo Viana
- O cálculo da profundidade de regiões de vetação a partir da modelagem de seu volume no software *Wireless InSite*

E como trabalhos futuros, sugere-se as seguintes pesquisas:

- Criação de um modelo de propagação determinístico baseado no traçado de raios, considerando a individualidade das árvores constituintes do bosque Camilo Viana
- Criação de um modelo de propagação determinístico baseado no traçado de raios, considerando a transmissão partindo de dentro do bosque Camilo Viana, para fora dele
- Implantação de um sistema de monitoramento de temperatura e umidade no bosque Camilo Viana por meio de redes *LoRa-IoT*
- Criação de um modelo de propagação determinístico baseado no traçado de raios para redes *IoT*, utilizando o sinal de *chirp*

Referências

- 1 HASSAN, Q. F. *Internet of Things A to Z: Technologies and Applications*. 1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 9.
- 2 BANDEIRA, L. K. R.; NETO, M. d. S. A. O que é um smart campus? *Perspectivas em gestão & conhecimento*, (João Pessoa, Brasil), v. 12, n. 1, p. 175–188, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/pgc/article/view/48610>. Acesso em: 21 de Abril de 2024. Citado na página 1.
- 3 SANTOS, B. P. et al. Internet das coisas: da teoria a prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Sociedade Brasileira de Computação (SBC), Porto Alegre, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 9.
- 4 1.0, L. A. T. M. W. *LoRaWAN™ What is it?* [S.l.], 2015. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/document/what-is-lorawan>. Acesso em: 2 de Maio de 2024. Citado na página 1.
- 5 RAPPAPORT, T. S. *Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas*. 2ª. ed. [S.l.]: Pearson Universidades, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 1, 14, 15 e 17.
- 6 KLAINA, H. et al. Implementation of an interactive environment with multilevel wireless links for distributed botanical garden in university campus. *IEEE access*, v. 8, p. 1–1, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 7.
- 7 KAMALUDIN, K. H.; ISMAIL, W. Water quality monitoring with internet of things (iot). v. 8, p. 18–23, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 7.
- 8 MASADAN, N. A. B.; HABAEBI, M. H.; YUSOFF, S. H. Lora lpwan propagation channel modelling in iium campus. p. 14–19, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 7.
- 9 LIMA, W. G. et al. Lora technology propagation models for iot network planning in the amazon regions. *Sensors*, (Basel, Switzerland), v. 24, n. 5, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- 10 BARBOSA, B. S. d. S. et al. Application of artificial neural networks for prediction of received signal strength indication and signal-to-noise ratio in amazonian wooded environments. *Sensors*, (Belém, Brasil), v. 24, n. 8, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2542>. Acesso em: 22 de Abril de 2024. Citado 11 vezes nas páginas 5, 7, 17, 18, 22, 30, 39, 40, 41, 43 e 46.
- 11 ROMKEY, J. Toast of the iot: The 1990 interop internet toaster. *Revista IEEE Consumer Electronics*, (Belém, Brasil), v. 6, n. 1, p. 116–119, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- 12 LOPES, A. V. R. *Análise estatística e modelagem empírica para campus densamente arborizado utilizando a tecnologia LoRa em 915 mhz*. 141 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2021. Citado 4 vezes nas páginas 10, 12, 13 e 14.

- 13 FERREIRA, S. C. B. *Metodologia para o posicionamento ótimo de gateways LoRa em um cenário Smart Campus utilizando a meta-heurística EPSO*. 97 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- 14 CRUZ, H. A. O. da. *Proposta de modelo de propagação com mobilidade baseado em rna para tecnologia lora (915mhz) para posicionamento de gateway utilizando algoritmos bioinspirados em smart campus*. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- 15 ALBUQUERQUE, Y. *Introdução a tecnologia LoRa*. 2020. Disponível em: <https://blog.smartkits.com.br/introducao-a-tecnologia-lora/>. Acesso em: 3 de Maio de 2024. Citado na página 13.
- 16 SCHILLER, J. *Mobile Communications (2nd Edition)*. 2. ed. [S.l.]: Addison Wesley, 2003. Citado na página 14.
- 17 GRUBISIC, S. *TÉCNICA DE TRAÇADO DE RAIOS ASSOCIADA A METAHEURÍSTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES*. 146 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Santa Catarina, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 15, 19, 20 e 21.
- 18 ALVES, F. A. *Modelo 2,5D de predição de propagação para ambientes interiores utilizando o método do traçado de raios*. 70 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Natal, Rio Grande do Norte, 2005. Citado na página 19.
- 19 INC., R. *Wireless InSite Reference Manual*. [S.l.], 2021. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.
- 20 MÖLLER, T.; TRUMBORE, B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal of graphics tools*, Taylor & Francis, v. 2, n. 1, p. 21–28, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 44.