

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

JHONATHA WYLLERSON RODRIGUES MEDEIROS

ESTUDO, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UMA REDE WAN EMPRESARIAL
INTERCONECTADA POR RADIOENLACES PTP E PTMP

UBERLÂNDIA

2023

JHONATHA WYLLERSON RODRIGUES MEDEIROS

ESTUDO, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UMA REDE WAN EMPRESARIAL
INTERCONECTADA POR RADIOENLACES PTP E PTMP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Lorenço Santos Vasconcelos

UBERLÂNDIA

2023

JHONATHA WYLLERSON RODRIGUES MEDEIROS

ESTUDO, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UMA REDE WAN EMPRESARIAL
INTERCONECTADA POR RADIOENLACES PTP E PTMP

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações.

Uberlândia, 2023

Banca Examinadora:

Lorenço Santos Vasconcelos – Doutorado (UFU)

Diego de Brito Piau - Doutorado (UFU)

Gustavo Nozella Rocha – Mestrado (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo esforço, carinho e motivação, a minha namorada pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis, a meus amigos que estiveram ao meu lado durante essa jornada, aos professores que ministraram as aulas e compartilharam seus conhecimentos e ao meu orientador por ter me acompanhado, ajudado com minhas dúvidas e instruído da melhor forma possível.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar estes agradecimentos a todas as pessoas que estiveram presentes em minha trajetória acadêmica e contribuíram para o sucesso deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Jerusalino e Fernanda, e minha irmã Jéssica, por todo o amor, apoio e incentivo que me deram ao longo de toda a minha jornada. Sem a presença de vocês em minha vida, nada disso seria possível. Destaco ainda neste parágrafo o quanto meu pai foi importante para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que ele é um excelente profissional de muitos anos da área de Eletrônica e Telecomunicações e pode me ajudar na prática e teoria, além de ter me dado a oportunidade de atuar na área ao seu lado, permitindo-me a aplicar toda a experiência adquirida nesta longa jornada no meio acadêmico.

Minha namorada, Samela, merece uma menção especial por ter sido uma grande inspiração e um grande suporte em todos os momentos, me motivando a nunca desistir e a sempre ir além.

Também gostaria de agradecer aos meus professores do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, que foram fundamentais em minha formação e me proporcionaram uma educação de excelência.

Meu orientador, Lorenço, merece todo o meu reconhecimento pela dedicação, paciência e comprometimento com a minha formação, ele foi fundamental para o sucesso deste trabalho de conclusão de curso.

A minha tutora do Programa de Educação Tutorial (PET), Milena, foi uma grande mentora e amiga, sempre disposta a ajudar e guiar no meu processo de aprendizagem.

Agradeço também ao coordenador do curso por ter liderado uma equipe dedicada e comprometida em oferecer uma formação de qualidade, além de ter auxiliado positivamente em minhas escolhas, e me motivado a não desistir, por mais desafiante que fosse.

Por fim, não poderia deixar de mencionar meus amigos da faculdade e extra faculdade, que compartilharam momentos incríveis e fizeram toda a diferença nesta jornada.

A todos, o meu muito obrigado! Este trabalho de conclusão de curso é também de vocês.

" O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem - mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir."

(Albert Einstein)

RESUMO

Os enlaces de micro-ondas continuam sendo uma importante solução na área de telecomunicações. Apesar do surgimento de tecnologias concorrentes, como a fibra óptica e o 5G, os enlaces de rádio ainda são a escolha mais adequada para atender regiões mais afastadas ou com limitações geográficas, principalmente nos casos onde o contratante necessita de comunicação rápida com suas filiais à até quilômetros de distância.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o estudo e otimização da estrutura de telecomunicações de uma empresa que possui todas as suas filiais integradas em uma única rede WAN de alta performance com baixa latência. Além do estudo, é apresentado brevemente o sistema de voz PABX IP de larga escala utilizado pela empresa, bem como na rapidez e confiabilidade na troca de dados entre os funcionários e o servidor, localizado a quilômetros de distância.

O estudo é desenvolvido com base em diversas etapas, desde o planejamento do enlace de micro-ondas até a sua implantação e testes, incluindo algumas das configurações importantes a nível de rede como protocolos, roteamento e redirecionamento de portas, além da análise de performance da troca de dados entre as redes das filiais. O uso de bancos de dados consolidados, como o Google Elevation API e o Google Earth, é crucial para garantir a precisão do projeto, bem como o auxílio do software Pathloss para dimensionamento do sistema e cálculos de perda, além da ferramenta matemática Matlab para simulações e geração de gráficos.

É aplicada a metodologia sistêmica otimizada, elaborando o projeto sob medida para atender às finalidades técnicas e econômicas da empresa, evitando o superdimensionamento e utilizando margens em certos parâmetros dosados de acordo com o grau de precisão necessário. Para a conectividade com a internet, a empresa dispõe de um contrato do serviço de fibra óptica com o provedor local, e será adicionado o serviço de rede via satélite Starlink como um link de apoio.

Palavras-chave: baixa latência, enlaces de micro-ondas; PABX IP; projeto sistêmico otimizado; rede WAN; Starlink.

ABSTRACT

Microwave links continue to be an important solution in the field of telecommunications. Despite the emergence of competing technologies such as optical fiber and 5G, radio links are still the most suitable choice for serving remote regions or areas with geographical limitations, especially in cases where the client requires fast communication with its branches located kilometers away.

This work aims to present the study and optimization of the telecommunications infrastructure of a company that has all its branches integrated into a single high-performance, low-latency WAN network. In addition to the study, a brief overview of the large-scale IP PABX voice system used by the company is provided, as well as the speed and reliability of data exchange between employees and the server, located kilometers away.

The study is developed based on various stages, from the planning of the microwave link to its implementation and testing, including some important network-level configurations such as protocols, routing, and port redirection, as well as the analysis of data exchange performance between branch networks. The use of consolidated databases, such as Google Elevation API and Google Earth, is crucial to ensure the accuracy of the project, as well as the assistance of the Pathloss software for system sizing and loss calculations, along with the mathematical tool Matlab for simulations and graph generation.

An optimized systemic methodology is applied, tailoring the project to meet the technical and economic objectives of the company, avoiding over-sizing and using margins in certain parameters as needed for precision. For internet connectivity, the company has a contract for optical fiber service with the local provider, and the Starlink satellite network service will be added as a backup link.

Keywords: IP PABX; low latency; microwave links; optimized systemic project; Starlink; WAN Network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Réplica do transmissor de rádio inventado pelo Padre Landell de Moura.	25
Figura 2 - Redes LAN, MAN e WAN interligadas.	29
Figura 3 - Exemplo de topologia de telefonia IP.	31
Figura 4 - Classificação das Ondas Eletromagnéticas.	35
Figura 5 - Ondas Eletromagnéticas.	36
Figura 6 - Diferentes Tipos de Polarização da Onda Eletromagnética.	37
Figura 7 - Principais Mecanismos de Propagação.	38
Figura 8 - Propagação das ondas de superfície (<i>Ground Wave</i>).	40
Figura 9 - Propagação de Ondas Ionosféricas.	40
Figura 10 - Propagação das ondas diretas.	41
Figura 11 - Propagação das ondas difratadas.	41
Figura 12 - Aplicações das faixas de frequência.	44
Figura 13 - Aspectos das zonas de Fresnel numa ligação troposférica entre estação A e B. ...	46
Figura 14 - D é a distância entre o transmissor e o receptor; r é o raio da primeira zona de Fresnel ($n=1$) no ponto P. P está a uma distância d_1 do transmissor, e d_2 do receptor.	47
Figura 15 - Refração da onda ao passar de um meio para outro.	50
Figura 16 – Trajetória do sinal de rádio	51
Figura 17 - Raio equivalente da Terra.	52
Figura 18 - Valor de K excedido para 99,9% do tempo no pior mês do ano (clima continental temperado).	53
Figura 19 - Distribuição mundial da taxa pluviométrica.	58
Figura 20 - Taxas pluviométricas por região para várias porcentagens de tempo.	59
Figura 21 - Atenuação devido à atmosfera, por Km, para a frequência de 1 a 350 GHz no nível do mar para ar seco e vapor d'água com densidade de 7.5 g/m ³	63
Figura 22 - Valores do pL no Brasil.	70
Figura 23 - Exemplo de Diversidade de Espaço.	76
Figura 24 - Topologias P2P e P2MP utilizadas em conjunto.	88
Figura 25 - Perfil de elevação da visada direta entre Fomus e Agroporto.	90
Figura 29 - Perfil de elevação da visada direta entre Fomus e Munari.	93
Figura 30 - Dimensionamento da altura das antenas para o cenário da figura 29.	94
Figura 31 - Perfil de elevação da visada direta entre Munari e Agroporto.	95

Figura 32 - Dimensionamento da altura das antenas para o cenário da Figura 31 considerando a torre de 60 m.....	95
Figura 33 - Local da estação repetidora da fazenda Munari.....	96
Figura 34 - Valores de entradas para dimensionamento da altura das antenas para o cenário da figura 28 considerando o intervalo de frequências SHF.....	97
Figura 35 - Gráfico dos valores de altura da Antena B calculados em função do intervalo de frequência SHF.....	98
Figura 36 - Representação gráfica dos termos usados nos conceitos de perda de transmissão.	99
Figura 37 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 3 \text{ GHz}$	100
Figura 38 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 3 \text{ GHz}$	101
Figura 39 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 3 \text{ GHz}$	101
Figura 40 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 3 \text{ GHz}$	102
Figura 41 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 6 \text{ GHz}$	102
Figura 42 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 6 \text{ GHz}$	103
Figura 43 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 6 \text{ GHz}$	103
Figura 44 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 6 \text{ GHz}$	104
Figura 45 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 15 \text{ GHz}$	104
Figura 46 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 15 \text{ GHz}$	105
Figura 47 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 15 \text{ GHz}$	105
Figura 48 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 15 \text{ GHz}$	106

Figura 49 - Janela inicial do programa Pathloss 5.0.....	110
Figura 50 - Janela onde se configura a localidade e características iniciais de cada enlace do projeto.....	110
Figura 51 - Região de estudo com as estações mapeadas.....	111
Figura 52 - Primeira etapa na inserção do banco de dados de terreno da região.....	111
Figura 53 - Segunda etapa na inserção do banco de dados de terreno da região.....	112
Figura 54 - Terceira etapa na inserção do banco de dados de terreno da região.....	113
Figura 55 - Perfil de terreno gerado e enlaces posicionados.	113
Figura 56 - Janela de definições de cada aspecto do enlace.....	114
Figura 57 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Fomus - Agroporto.....	115
Figura 58 - Características do Enlace.....	116
Figura 59 - Dados das estações.....	117
Figura 60 - Parâmetros da antena escolhida para a simulação.	117
Figura 61 - Parâmetros do rádio escolhido para a simulação.....	117
Figura 62 - Valor de Kmín indicado pelo software.....	117
Figura 63 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Fomus - Munari.....	118
Figura 64 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Fomus – Munari usando frequência mais alta.....	118
Figura 65 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Munari - Agroporto.....	119
Figura 66 - Resultados teóricos considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.	121
Figura 67 - Resultados simulados considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.	122
Figura 68 - Resultados teóricos considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.	123
Figura 69 - Resultados simulados considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.	124
Figura 70 - (a) Dipolo com refletor de canto; (b) Geometria da antena parabólica e (c) antena parabólica com alimentação no ponto focal.	127
Figura 71 - Antena parabólica alimentada pelo ponto focal com blindagem e radome.	128
Figura 72 - Diagrama de radiação de uma antena representado por carta polar e cartesiana.	129
Figura 73 - Estrutura física dos cabos de pares trançados.....	130
Figura 74 - Tipos de Torres.....	131
Figura 75 - Etapas de uma transmissão digital.....	133

Figura 76 - Tipos de modulação.	134
Figura 77 - Modulação QPSK.	136
Figura 78 - Diagrama de Constelação para diferentes níveis.	136
Figura 79 - Exemplificação da tolerância a ruídos.	137
Figura 80 - Arquiteturas de Múltiplo Acesso.	138
Figura 81 - Parâmetros dos padrões 802.11n e 802.11ac para cálculo da taxa de dados.	139
Figura 82 - Simulação do enlace variando o valor da frequência.	144
Figura 83 - Filial Fomus na cidade de Uberlândia.	145
Figura 84 - CPD da filial Fomus.	146
Figura 85 - Escritório principal da empresa Agroporto.	148
Figura 86 - Equipamentos de rede e servidores Agroporto.	148
Figura 87 - AF-5XHD.	150
Figura 88 - Tabela da sensibilidade do sinal de recepção por tipo de modulação e largura de banda do canal.	150
Figura 89 - Taxa de dados máxima por tipo de modulação e largura de banda do canal.	151
Figura 90 - Antena ALGcom do Backbone instalada no topo do UBT.	152
Figura 91- Antena do enlace Fomus até Munari vista de frente.	152
Figura 92 - Características elétricas da antena.	153
Figura 93 - Diagrama de radiação da antena ALGcom.	153
Figura 94 - Antenas instaladas no topo da Torre na estação da Fazenda Munari.	154
Figura 95 - Características da antena RD-5G34.	155
Figura 96 - Diagrama de radiação da antena RD-5G34.	155
Figura 97 - Dados de localização e altitude informados pelos rádios de Rx e Tx.	157
Figura 98 - Dados gerais de parâmetros do rádio.	157
Figura 99 - Perfil de propagação no Pathloss considerando as alturas reais das antenas.	158
Figura 100 - VGR do enlace de Fomus até Munari.	158
Figura 101 - Novos resultados simulados no Pathloss utilizando as alturas reais das antenas.	159
Figura 102 - Leitura do equipamento para as características mencionadas anteriormente. ...	160
Figura 103 - Zona de Fresnel apresentada pelo software do AF-5XHD.	161
Figura 104 - Potencial de transmissão antes e após otimização.	163
Figura 105 - Registro de chuva intensa na região do enlace.	164
Figura 106 - Leitura do equipamento em clima limpo e clima chuvoso.	165
Figura 107 - Diagrama de constelação em tempo real.	166

Figura 108 - Dados reais do segundo enlace do backbone.....	167
Figura 109 - Estação em uso na empresa Fomus conectada por Wi-Fi.....	169
Figura 110 - Regra de roteamento presente no roteador localizado na Fomus.	169
Figura 111 - Configuração da interface WAN do roteador da Fomus.	170
Figura 112 - Configuração da WAN do Roteador da empresa Agroporto.....	171
Figura 113 - Configuração de " <i>Virtual Servers</i> " para acesso remoto aos dispositivos da Agroporto.	172
Figura 114 - Configuração que deve ser feita para acessar o Multibovinos a partir da Fomus.	172
Figura 115 - <i>Ping</i> no servidor da Agroporto a partir da Fomus antes da otimização do enlace.	173
Figura 116 - <i>Ping</i> no servidor da Agroporto a partir da Fomus após a otimização do enlace.	173
Figura 117 - Tela principal do software Multibovinos com usuário autenticado a partir da Fomus.	174
Figura 118 - Mapeamento de unidade de rede do servidor da Agroporto em uma estação da Fomus.	174
Figura 119 - <i>Ping</i> no servidor de telefonia a partir de estação localizado na Agroporto.	175
Figura 120 - Ramal ativo na empresa Agroporto.	176
Figura 121 - Telefone IP registrado no servidor de telefonia localizado em Uberlândia.....	176
Figura 122 – Primeiro NVR da Agroporto visto a partir de estação em Uberlândia.	177
Figura 123 - Segundo NVR da Agroporto visto a partir de estação em Uberlândia.	177
Figura 124 - Maquinários agrícolas que fazem uso da rede mesh da Agroporto para telemetria.	178
Figura 125 - Veículo misturador e distribuidor de ração que faz uso da rede mesh.	179
Figura 126 - Telemetria dos talhões.	179
Figura 127 - Dados de produção enviados pela rede mesh.	180
Figura 128 - Telemetria do gado enviado pela rede mesh.....	180
Figura 129 - Starlink de acionista testada na fazenda Agroporto.....	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Faixas de Frequências.....	42
Tabela 2 -	Tipos/Causas de Desvanecimento.....	49
Tabela 3 -	Coeficientes dependentes de frequência para estimar a atenuação específica de chuva.....	60
Tabela 4 -	Fator de piora por configuração de RF.....	66
Tabela 5 -	Valor do C_0 por Tipo e Altitude do Terreno.....	69
Tabela 6 -	Fator de piora por configuração de RF.....	79
Tabela 7 -	Dados geográficos Fomus e Agroporto.....	90
Tabela 8 -	Dados geográficos Fomus e Munari.....	93
Tabela 9 -	Valores de atenuação em dB na propagação no espaço livre para diferentes frequências e tipos de polarização.....	107
Tabela 10 -	Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo em dB na propagação no espaço livre para diferentes frequências e tipos de polarização.....	108
Tabela 11 -	Probabilidade de desvanecimento em porcentagem na propagação no espaço livre para diferentes frequências.....	108
Tabela 12 -	Padronização dos cabos UTP segundo norma EIA/TIA-568-B.....	130
Tabela 13 -	Valores lidos pelo rádio transmissor para diferentes parâmetros.....	161
Tabela 14 -	Valores lidos pelo rádio receptor para diferentes parâmetros.....	162

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta Geração
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARPANET	<i>Advanced Research Projects Agency Network</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CETUC	Centro de Estudos em Telecomunicações
CFTV	Circuito fechado de televisão
Codec	<i>Coder/Decoder</i>
CPD	Central de Processamento de Dados
CTB	Companhia Telefônica Brasileira
DEM	<i>Digital Elevation Module</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
EHX	<i>Extremely High Frequency</i>
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
EMBRATEL	Empresa Brasileira de Telecomunicações
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IDU	<i>Indoor Unit</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-D	<i>ITU Telecommunication Development Sector</i>
ITU-R	<i>ITU Radiocommunication Sector</i>

ITU-T	<i>ITU Telecommunication Standardization Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
LTU	<i>Long Term Ubiquiti</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
Mbps	Mega bits por segundo
MC	Ministério das Comunicações
MF	<i>Medium Frequency</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAT	<i>Network Adress Translation</i>
ODU	<i>Outdoor Unit</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
P2P	<i>Point to Point</i>
P2MP	<i>Point to Multipoint</i>
PABX IP	<i>Private Automatic Branch Exchange over Internet Protocol</i>
PoE	<i>Power over Ethernet</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
RTT	<i>Round-Trip Time</i>
SES	Segundos Severamente Errados
SESR	<i>Second Severely Error Seconds Ratio</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UBT	Uberlândia Business Tower
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VGR	<i>Variable Gradient Ray Tracing</i>
VLf	<i>Very Low Frequency</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>

XPD	<i>Cross-Polarization Discrimination</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WebRTC	<i>Web Real-Time Communications</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
1.1	UM BREVE HISTÓRICO DOS AVANÇOS DAS TELECOMUNICAÇÕES	23
1.2	AS TELECOMUNICAÇÕES NO BRASIL	24
1.3	ÓRGÃOS REGULAMENTADORES DAS TELECOMUNICAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO	26
1.4	UNIÃO INTERNACIONAL DAS TELECOMUNICAÇÕES.....	27
1.5	REDES DE COMPUTADORES E A INTERNET	28
1.6	TELEFONIA E PABX SOBRE PROTOCOLO DE INTERNET	30
1.7	TRANSMISSÃO POR MICRO-ONDAS E OS RADIOENLACES	31
1.8	JUSTIFICATIVA.....	32
1.9	OBJETIVOS.....	33
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1	CONCEITOS PRIMORDIAIS: TELECOMUNICAÇÕES E PROPAGAÇÃO	34
2.2	MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO	34
2.2.1	Ondas Eletromagnéticas	35
2.2.2	Meios de Transmissão	37
2.2.3	Tipos de propagação.....	39
2.2.3.1	Ondas de Superfície.....	39
2.2.3.2	Ondas Ionosféricas	40
2.2.3.2	Ondas Diretas	41
2.2.3.3	Ondas Difradas	41
2.2.3.4	Ondas Espalhadas.....	42
2.2.4	Faixas de Frequências	42
2.2.5	Zona ou Elipsoide de Fresnel	45
2.2.6	Decibel.....	47
2.2.7	Propagação e Perda no Espaço Livre	48
2.3	DESVANECIMENTO PLANO E SELETIVO	49
2.4	REFRAÇÃO.....	50
2.4.1	Refração das Ondas de Rádio na Atmosfera	51
2.4.2	Raio Terrestre Equivalente	52
2.4.3	Dutos	54
2.5	DIFRAÇÃO.....	54

2.5.1	Estimativa de Perda por Difração.....	55
2.6	REFLEXÃO	56
2.7	ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVAS	57
2.7.1	Método do ITU-R P.838-3 e P.530-18	59
2.7.2	Distância Efetiva do Enlace	61
2.8	ATENUAÇÃO CAUSADA PELOS GASES ATMOSFÉRICOS	62
2.9	DEGRADAÇÃO DO XPD (CROSS-POLARIZATION DISCRIMINATION).....	63
2.10	ATENUAÇÃO TOTAL LÍQUIDA	64
2.11	CRITÉRIOS DE VISIBILIDADE	65
2.12	CÁLCULO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE.....	67
2.12.1	Nível de Recepção Nominal.....	67
2.12.2	Margem Líquida do Enlace	68
2.12.3	Probabilidade de Desvanecimento Plano e Seletivo	68
2.12.3.1	Probabilidade de Desvanecimento Plano	69
2.12.3.2	Probabilidade de Indisponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano.....	70
2.12.3.3	Probabilidade Desvanecimento Seletivo	71
2.12.3.4	Probabilidade de Interrupção Devido ao Desvanecimento Seletivo	71
2.12.4	Probabilidade total de ocorrência de SES	72
2.12.5	Indisponibilidade do enlace devido à chuva.....	73
2.12.6	Cálculo da Porcentagem para o Pior Mês (ITU-R 841)	73
2.12.7	Indisponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano e Seletivo.....	74
2.12.8	Indisponibilidade do Equipamento.....	74
2.12.9	Indisponibilidade Total.....	75
2.13	FATORES DE MELHORIA DE DIVERSIDADE DE FREQUÊNCIA E ESPAÇO.....	75
2.13.1	Fator de Melhoria da Contramedida.....	77
2.13.2	Fator de Melhoria da Diversidade de Frequência	77
2.13.2.1	Desvanecimento Plano	77
2.13.2.2	Desvanecimento Seletivo	78
2.13.3	Fator de Piora para a Configuração (n+1).....	79
2.13.4	Fator de Melhoria da Diversidade de Espaço.....	80
2.13.4.1	Desvanecimento Plano	80
2.13.4.2	Desvanecimento Seletivo	81
2.13.5	Fator de Melhoria Composta de Diversidade de Frequência e Espaço.....	81
3.	DESENVOLVIMENTO	83

3.1	TIPOS DE ENLACE EM TERMOS DE SUA LOCALIZAÇÃO NA REDE DE TRANSMISSÃO	83
3.2	DEMANDA E SOLUÇÃO APLICADA ATUALMENTE.....	84
3.3	TOPOLOGIA DOS SISTEMAS DE RÁDIO.....	85
3.3.1	Ponto a Ponto (P2P)	86
3.3.2	Ponto a Multiponto (P2MP)	86
3.4	DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DOS ENLACES DO <i>BACKBONE</i>	88
3.4.1	<i>Site Survey</i>	88
3.4.2	Análise do Percurso sem Repetição do Sinal	90
3.4.3	Análise do Percurso com Repetição do Sinal.....	92
3.4.4	Breve Estudo do Impacto da Frequência de Transmissão no Cálculos das Alturas das Antenas	97
3.4.5	Atenuação Total do Enlace.....	99
3.4.5.1	Perdas no Espaço Livre	100
3.4.5.2	Análise dos Resultados Obtidos	107
3.5	PATHLOSS 5.0.....	109
3.5.1	Inserção dos Enlaces no Software	109
3.5.2	Inserção do Modelo Digital de Elevação	111
3.5.3	Dimensionamento dos Enlaces no Software	114
3.5.3.1	Enlace Fomus até Agroporto	115
3.5.3.2	Enlace Fomus até Munari.....	115
3.5.3.3	Enlace Munari até Agroporto	119
3.6	CÁLCULO DO DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE	119
3.6.1	Enlace Fomus até Munari.....	121
3.6.2	Enlace Munari até Agroporto	123
3.6.3	Discussão dos Resultados.....	125
3.7	COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS DE RADIOVISIBILIDADE.....	125
3.7.1	Sistema Aéreo.....	126
3.7.1.1	Antenas	126
3.7.1.2	Ganho da Antena e Diagrama de radiação	128
3.7.1.3	Cabos de Par Trançado e Pigtails	129
3.7.1.4	Torres	131
3.7.2	Rádio Digital	133
3.7.2.1	Modulação e Demodulação	133

3.7.2.2	Modulações em Amplitude, Frequência e Fase.....	134
3.7.2.3	QPSK e QAM.....	135
3.7.2.4	Arquiteturas de Múltiplo Acesso.....	137
3.7.2.5	Tabela MCS.....	138
3.7.2.6	Blocos Funcionais dos Equipamentos de Rádio.....	140
3.7.2.7	Configuração dos Sistemas de Proteção RF.....	141
3.7.2.8	Parâmetros Sistêmicos.....	142
3.7.3	Variação da Frequência de Transmissão.....	144
4.	MATERIAIS E METODOS.....	145
4.1	ESCRITÓRIOS DAS FILIAIS FOMUS E AGROPORTO E SEUS CPD.....	145
4.2	EQUIPAMENTO DE RÁDIO DO BACKBONE – AIRFIBER 5X HD.....	149
4.3	ANTENAS UTILIZADAS NO BACKBONE.....	152
4.3.1	Enlace Fomus até Munari.....	152
4.3.2	Enlace Munari até Agroporto.....	154
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	156
5.1	SIMULAÇÃO DO ENLACE FOMUS ATÉ MUNARI SOB CONDIÇÕES REAIS 156	
5.2	DADOS REAIS DO EQUIPAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO ENLACE FOMUS ATÉ MUNARI.....	160
5.3	IMPACTO DE CLIMA CHUVOSO NO ENLACE.....	164
5.4	RECURSO DE SELEÇÃO AUTOMÁTICA DA TÉCNICA DE MODULAÇÃO E SUA IMPORTÂNCIA.....	165
5.5	DADOS REAIS DO EQUIPAMENTO E QUALIDADE DO ENLACE MUNARI ATÉ AGROPORTO.....	167
5.6	VALIDAÇÃO DO RADIOENLACE: ATENDIMENTO EFETIVO ÀS NECESSIDADES DA EMPRESA.....	168
5.6.1	Conectividade das estações da Fomus com o servidor localizado na Agroporto.....	168
5.6.2	Comunicação com o servidor PABX IP.....	175
5.6.3	Monitoramento remoto da empresa.....	176
5.6.4	Envio de dados de telemetria através da rede mesh.....	178
5.7	STARLINK.....	180
6.	CONCLUSÃO.....	182
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	184

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DAS ANTENAS.....	191
APÊNDICE B – CÓDIGO DO APÊNDICE A APRIMORADO PARA ESTUDO DE INTERVALO DE FREQUÊNCIAS	192
APÊNDICE C – CÓDIGO DO APÊNDICE A APRIMORADO PARA ESTUDO DAS ATENUAÇÕES NA PROPAGAÇÃO E ESPAÇO LIVRE	193
APÊNDICE D – CÓDIGO DO APÊNDICE C APRIMORADO PARA ESTUDO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE.....	196
APÊNDICE E – DIAGRAMA DE REDE	202

1. INTRODUÇÃO

1.1 UM BREVE HISTÓRICO DOS AVANÇOS DAS TELECOMUNICAÇÕES

A história das telecomunicações remonta a mais de um século, quando as primeiras transmissões de telegrafia foram realizadas por fios de cobre. A partir daí, a evolução foi constante, incluindo a invenção do telefone, a transmissão de rádio, televisão e, posteriormente, a internet.

Uma das tecnologias mais importantes nessa evolução foram os radioenlace de micro-ondas. Guglielmo Marconi, inventor italiano, é considerado um dos pioneiros na invenção e desenvolvimento do rádio. Um dos marcos mais importantes em sua carreira foi a criação do radioenlace em 1895, que permitia a transmissão de sinais de rádio entre dois pontos distantes sem a necessidade de cabos ou fios. Em 1899, Marconi patenteou sua invenção do radioenlace e, no mesmo ano, estabeleceu um enlace de rádio de longa distância entre França e Inglaterra, o qual se tornou o primeiro exemplo bem-sucedido de uma comunicação de rádio transoceânica (1).

Os sistemas de transmissão por enlaces de micro-ondas foram amplamente utilizados na década de 1950 para a transmissão de sinais de televisão em todo o mundo. Desde então, os radioenlace de micro-ondas se tornaram uma importante solução na área de telecomunicações, sendo aprimorados constantemente, permitindo a transmissão de dados e voz a longas distâncias (2).

Juntamente com a evolução dos radioenlace, a telefonia também passou por grandes mudanças ao longo dos anos. No ano de 1876 Alexander Graham Bell anunciava a invenção do primeiro telefone e já na década de 1970 a telefonia móvel foi introduzida, possibilitando uma comunicação mais acessível e flexível (3).

A telefonia evoluiu para sistemas baseados em IP (*Internet Protocol*), como o VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e o PABX IP (*Private Automatic Branch Exchange over Internet Protocol*). VoIP é uma tecnologia que permite a transmissão de voz pela internet, possibilitando a redução de custos em ligações. Já o PABX IP é um sistema de telefonia que utiliza a rede IP

para conectar ramais telefônicos em diferentes locais, possibilitando a comunicação entre diferentes filiais de uma empresa de forma mais eficiente (3).

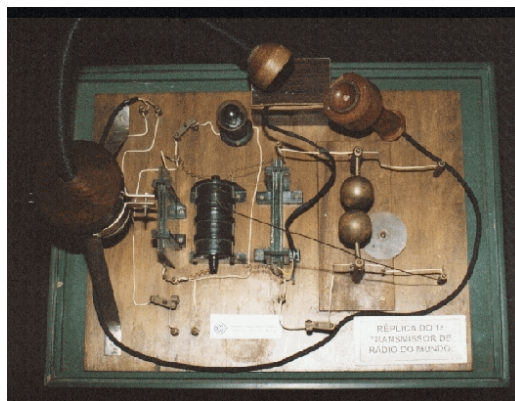
A evolução das redes de computadores também foi um fator importante nestes avanços tecnológicos. As redes WAN (*Wide Area Networks*) permitem a conexão de diferentes dispositivos em diferentes localizações, possibilitando a troca de informações em tempo real e que as empresas conectem seus escritórios e filiais em todo o mundo. A internet surgiu na década de 1960 como uma rede de computadores experimental e tornou-se uma das maiores redes de comunicação do mundo, com bilhões de usuários e uma infinidade de serviços online (4).

Hoje, a evolução das telecomunicações continua, com avanços em tecnologias como 5G (Quinta Geração), Starlink, inteligência artificial e *Internet of Things* (IoT), que prometem revolucionar ainda mais a maneira como as pessoas se conectam e comunicam.

1.2 AS TELECOMUNICAÇÕES NO BRASIL

A história das telecomunicações no Brasil remonta ao século XIX, com a introdução do telégrafo elétrico em 1852. Ao longo do tempo, foram surgindo outras tecnologias, como o telefone em 1877, quando foi inaugurada a primeira linha telefônica no Rio de Janeiro. Em 1893 o padre e cientista Roberto Landell de Moura foi quem fez a primeira radiotransmissão (uma réplica de sua invenção é apresentada na Figura 1), além disso inventou o telégrafo sem fio, o telefone sem fio e o transmissor de ondas sonoras. No entanto, foi na década de 1960 que ocorreu um grande salto no setor, com a implantação dos primeiros enlaces de micro-ondas (5).

Figura 1 - Réplica do transmissor de rádio inventado pelo Padre Landell de Moura.



Fonte: extraído de (6).

O principal marco do avanço nas telecomunicações no Brasil ocorreu entre o final dos anos 1960 e a década de 1970. Criou-se um sistema que cobriu praticamente todo o território com uma rede de comunicações enorme: micro-ondas (tropodifusão), satélites e cabos submarinos de telex. Foi nessa época que nasceu a empresa estatal de telecomunicações, a Embratel. Na metade dos anos 1970, duas mil localidades eram atendidas pelo telex (7).

Iniciaram-se as operações via satélite em grande escala. Nos anos 1980, com o satélite Brasilsat 2, ampliou-se consideravelmente a área coberta pelas redes nacionais de televisão (7).

Um dos principais projetos de enlaces de micro-ondas no Brasil foi a construção da rede de comunicação para a transmissão dos jogos da Copa do Mundo de 1970, realizada no México. Segundo a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), essa rede contava com mais de 6.000 km de cabos e 147 estações repetidoras de micro-ondas (7).

Ao longo das décadas seguintes, as telecomunicações no Brasil passaram por diversas transformações, como a privatização da Embratel e a abertura do mercado de telecomunicações para a iniciativa privada. A popularização da internet também trouxe novas demandas para o setor, como a necessidade de infraestrutura para conexão à rede mundial de computadores.

Hoje em dia, a tecnologia de enlaces de micro-ondas ainda é utilizada no Brasil para a transmissão de dados e voz em áreas remotas e de difícil acesso, sendo considerada uma solução eficiente e econômica para a comunicação em longas distâncias.

Essa trajetória de desenvolvimento trouxe consigo a necessidade de estabelecer órgãos regulamentadores capazes de supervisionar e garantir o funcionamento adequado desse setor vital. Portanto, é importante compreender o papel desempenhado pelos órgãos

regulamentadores das telecomunicações, não apenas no contexto brasileiro, mas também em escala global.

1.3 ÓRGÃOS REGULAMENTADORES DAS TELECOMUNICAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO

No Brasil, os principais órgãos regulamentadores da telecomunicação são:

- **Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL):** responsável pela regulação, fiscalização e controle do setor de telecomunicações no país;
- **Ministério das Comunicações (MC):** órgão responsável por formular políticas e diretrizes para o setor de telecomunicações no país;
- **Conselho Diretor da ANATEL:** composto por cinco membros, é o órgão máximo de deliberação da agência reguladora e é responsável por tomar decisões estratégicas e definir a política regulatória do setor de telecomunicações no Brasil.

No mundo, os principais órgãos regulamentadores da telecomunicação são:

- ***International Telecommunications Union (ITU)*:** agência especializada da ONU que estabelece padrões globais para a indústria de telecomunicações e promove o acesso à tecnologia em todo o mundo;
- ***Federal Communications Commission (FCC)*:** agência governamental dos Estados Unidos responsável pela regulamentação das comunicações interestaduais e internacionais por rádio, televisão, cabo e satélite;
- ***European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*:** organização europeia de padronização que desenvolve padrões para telecomunicações e tecnologias relacionadas na Europa.

1.4 UNIÃO INTERNACIONAL DAS TELECOMUNICAÇÕES

A ITU merece destaque nesta monografia, uma vez que várias de suas recomendações foram aplicadas no desenvolvimento do estudo. Fundada em 1865, ela é uma das mais antigas organizações internacionais e tem sede em Genebra, na Suíça (8).

A agência é responsável por desenvolver normas e padrões para as telecomunicações, atribuir frequências de rádio e coordenar o uso do espectro de radiofrequência entre os países. Ela também promove o progresso das telecomunicações em países em desenvolvimento e oferece assistência técnica em áreas como regulação, segurança cibernética e infraestrutura. No Brasil, a ITU é representada pelo MC e pela ANATEL, que trabalham em conjunto com a agência para implementar as normas e regulamentos internacionais relacionados às telecomunicações.

As recomendações da ITU, também conhecidas como padrões ITU, são normas técnicas estabelecidas pela agência para garantir a interoperabilidade global e a qualidade dos serviços de telecomunicações. Esses padrões são amplamente utilizados e incluem, por exemplo, padrões para modulação de sinal, codificação de voz e vídeo, roteamento de dados, segurança, entre outros (9).

A criação de recomendações pela ITU é um processo colaborativo e multissetorial, que envolve a participação de especialistas técnicos, reguladores, provedores de serviços de telecomunicações, fabricantes de equipamentos e outros *stakeholders* (indivíduo ou organização que, de alguma forma, é impactado pelas ações de uma determinada empresa).

Os três setores principais da ITU são (9):

- **Setor de Radiocomunicações (ITU-R):** É responsável pelo gerenciamento do espectro de frequências de rádio e pelos padrões relacionados às tecnologias de radiocomunicação. Suas atividades incluem a elaboração de regulamentos e recomendações para o uso do espectro de rádio, o estabelecimento de padrões para equipamentos e sistemas de comunicação, e a coordenação internacional de frequências de rádio para prevenir interferências entre sistemas;
- **Setor de Normalização (ITU-T):** É responsável por desenvolver padrões e recomendações para tecnologias de comunicação e informação. O setor trabalha em

colaboração com outras organizações de padronização, como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e o ISO (*International Organization for Standardization*), para garantir a interoperabilidade entre sistemas e equipamentos de diferentes fabricantes;

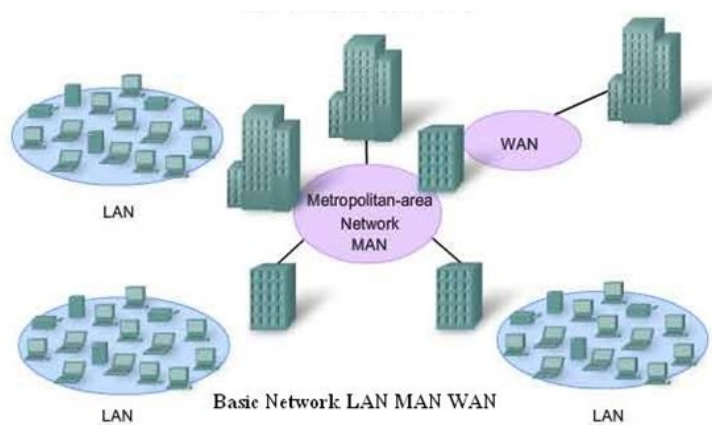
- **Setor de Desenvolvimento (ITU-D):** É responsável por promover o progresso da telecomunicação em países em desenvolvimento, fornecendo assistência técnica e financeira, compartilhando conhecimentos e recursos e desenvolvendo capacidades técnicas e regulatórias. O setor também trabalha para reduzir a lacuna digital entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Com as redes de telecomunicações formando a espinha dorsal da conectividade, esses órgãos são responsáveis por assegurar que a infraestrutura da internet e das redes de computadores seja robusta e segura, permitindo que as comunicações e o acesso à informação alcancem níveis cada vez mais elevados de eficiência e abrangência.

1.5 REDES DE COMPUTADORES E A INTERNET

Redes de computadores são sistemas interconectados que permitem a troca de informações e recursos entre usuários e máquinas. Essas redes podem ser classificadas de acordo com seu tamanho e abrangência, como LAN (*Local Area Networks*), MAN (*Metropolitan Area Networks*) e WAN (*Wide Area Networks*), exemplificadas pela Figura 2. "A internet é a maior rede de computadores do mundo e consiste em milhões de redes interconectadas que compartilham uma variedade de serviços, incluindo correio eletrônico, transferência de arquivos, acesso a informações e páginas da web" (4).

Figura 2 - Redes LAN, MAN e WAN interligadas.



Fonte: extraído de (11).

A internet é composta por diversos tipos de dispositivos e tecnologias de rede, desde roteadores e *switches* (ou comutadores em português) até protocolos de comunicação, como TCP (*Transmission Control Protocol*), IP, DNS (*Domain Name System*) e HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*). Ela foi criada a partir do projeto ARPANET (*Advanced Research Projects Agency Network*), uma rede de computadores desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos EUA na década de 1960 (4).

O surgimento da internet mudou significativamente a forma como as pessoas e as empresas se comunicam e realizam negócios. Empresas de todo o mundo utilizam a internet para estabelecer conexões entre seus escritórios, filiais e colaboradores remotos, permitindo a colaboração e a comunicação em tempo real. Além disso, a internet também possibilitou o surgimento de novas tecnologias e serviços, como o comércio eletrônico, o *streaming* de vídeo e música, as redes sociais e as aplicações de videoconferências. "A internet se tornou uma ferramenta poderosa para a criação e o compartilhamento de conhecimento, o comércio, o entretenimento, a comunicação pessoal e corporativa, entre outros" (4).

A evolução das tecnologias de rede e da internet tem trazido cada vez mais recursos e funcionalidades, tornando-a uma ferramenta fundamental para as comunicações e o comércio global. A internet móvel, por exemplo, permite o acesso à internet através de dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets*, enquanto a internet das coisas possibilita a conexão e o controle de dispositivos em tempo real (4).

A telefonia convencional, com o avanço da internet, foi aos poucos sendo aprimorada pelo uso de centrais telefônicas baseadas em software, como será visto na seção a seguir.

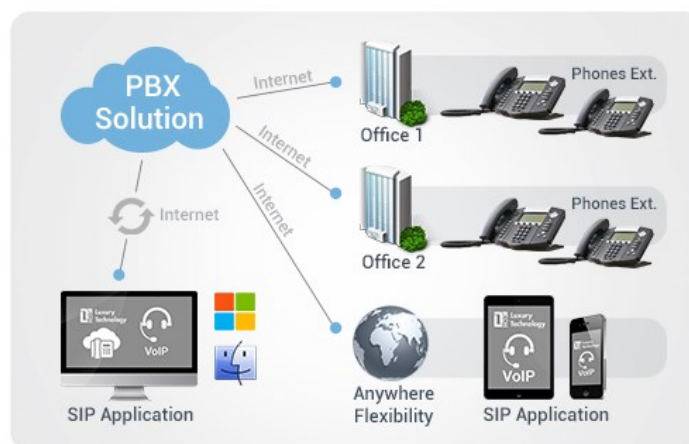
1.6 TELEFONIA E PABX SOBRE PROTOCOLO DE INTERNET

A telefonia IP, também conhecida como VoIP, é uma tecnologia que permite a transmissão de voz e dados através da internet. Essa tecnologia transformou a forma como as empresas realizam suas comunicações devido às suas vantagens em relação à telefonia tradicional, como custo reduzido, maior flexibilidade, mobilidade e escalabilidade. Com o PABX IP, uma central telefônica baseada em *software*, é possível gerenciar diversas linhas telefônicas de forma integrada, possibilitando a realização de chamadas de voz e vídeo conferência, além de recursos avançados como filas de espera, gravação de chamadas e roteamento inteligente (12).

A tecnologia VoIP tem evoluído significativamente nos últimos anos, com o surgimento de novas soluções, como os sistemas em nuvem, que permitem às empresas terem acesso a um sistema de telefonia completo e atualizado sem a necessidade de investir em equipamentos e manutenção. Além disso, a tecnologia também tem se adaptado às necessidades dos trabalhadores remotos, permitindo que as empresas forneçam acesso a seus sistemas de telefonia a partir de qualquer lugar do mundo. A qualidade de voz tem melhorado significativamente com o uso de Codec's (*Coder/Decoder*) mais avançados, como o Opus. Outra evolução importante é a implementação do protocolo WebRTC (*Web Real-Time Communications*), que permite a realização de chamadas diretamente no navegador *web*, sem a necessidade de instalar um aplicativo específico (12).

Em resumo, a telefonia IP e o PABX IP são soluções tecnológicas que revolucionaram a forma como as empresas se comunicam. Com a evolução contínua dessas tecnologias, espera-se que cada vez mais empresas possam se beneficiar de seus recursos, melhorando a produtividade e a eficiência de suas comunicações.

Figura 3 - Exemplo de topologia de telefonia IP.



Fonte: Obtido de (13).

Para a comunicação entre os dispositivos, como apresenta a Figura 3, é necessária uma conexão cabeada ou sem fio, nesse ponto os enlaces de micro-ondas desempenham um papel fundamental.

1.7 TRANSMISSÃO POR MICRO-ONDAS E OS RADIOENLACES

A transmissão por micro-ondas é um método de comunicação sem fio que usa ondas de rádio de alta frequência para enviar informações entre dois pontos, podendo estar a quilômetros de distância, dependendo do dimensionamento do sistema. A utilização de micro-ondas na transmissão de dados tem várias vantagens, incluindo a velocidade, segurança e confiabilidade (12).

A tecnologia de transmissão por micro-ondas tem evoluído ao longo do tempo, permitindo a transmissão de dados a taxas cada vez mais altas. As primeiras redes de micro-ondas foram construídas na década de 1950, com taxas de transmissão de dados de apenas algumas centenas de kilobits por segundo. Atualmente, as taxas de transmissão de dados de redes de micro-ondas modernas podem chegar a vários gigabits por segundo, tornando-se uma opção viável para a transmissão de dados de alta velocidade em longas distâncias. “O desenvolvimento de tecnologias de modulação mais avançadas, bem como a utilização de

bandas de frequência mais altas foram cruciais para o aumento da capacidade de transmissão de dados por micro-ondas” (14).

1.8 JUSTIFICATIVA

A presente monografia tem como objetivo apresentar um estudo de engenharia de rede, focando a infraestrutura de comunicação de um grupo de empresas associadas, analisando a disponibilidade do sistema atualmente utilizado, capacidade, resistência a falhas e possibilidades de melhoria. A importância desse estudo reside na necessidade de garantir um ambiente de rede sólido e eficiente.

O estudo se concentra em uma análise aprofundada do enlace que atende especificamente à empresa Agroporto Agricultura e Pecuária Ltda., sediada na zona rural de Tupaciguara – MG, na necessidade de troca de informações com sua empresa filiada Fomus Consultoria Ltda. localizada no prédio comercial Uberlândia Business Tower (UBT). O acesso a dados críticos, como informações de clientes, dados financeiros e a máquina hospedeira do software Multibovinos, executando em um servidor na Agroporto, é vital para a operacionalidade da empresa. Portanto, a robustez e eficiência da rede são fundamentais para garantir esse acesso.

A empresa conta com uma equipe de segurança que opera remotamente, a qual depende do sistema de monitoramento instalado na empresa e precisa visualizar as imagens em tempo real. A realização desta demanda depende de uma rede estável, com alta capacidade de tráfego de dados e confiabilidade.

A implementação de um sistema de comunicação de ponta, com custos controlados, visa facilitar a comunicação interna entre as empresas do grupo, bem como com os clientes, tanto em território nacional quanto internacional.

Outro aspecto de destaque é a necessidade de uma rede *mesh* para a empresa Agroporto. Essa topologia de rede, em que os dispositivos se interconectam formando uma malha, proporciona maior cobertura e flexibilidade na comunicação com os maquinários agrícolas em operação na área, os quais enviam dados de telemetria durante todo o tempo de operação.

Este estudo de engenharia de rede baseia-se na importância de garantir um ambiente de comunicação eficiente, seguro e de alto desempenho para atender às demandas críticas das empresas associadas. Uma infraestrutura de rede bem planejada e implementada é fundamental para garantir a continuidade das operações, a segurança dos dados e a satisfação dos clientes.

Além disso, esse trabalho tem como foco contribuir para a comunidade de engenheiros profissionais da área de telecomunicações, servindo como um guia para aqueles que pretendem empreender projetos de redes similares, apresentando passo a passo, melhores práticas e soluções específicas, proporcionando um legado útil para aqueles que se aventurarem nesta área desafiadora e vital.

1.9 OBJETIVOS

Baseado nas necessidades da empresa em questão e na aplicação dos conhecimentos multidisciplinares adquiridos ao longo do curso, os objetivos deste trabalho são:

- Apresentar o estudo do projeto a nível de engenharia dos principais enlaces que compõem a rede WAN privada.
- Realização de testes reais dos enlaces de micro-ondas projetados e comparação com os resultados obtidos a partir de simulações no MATLAB desenvolvidas pelo autor e pelas obtidas utilizando a ferramenta Pathloss.
- Otimização dos radioenlaces que se fizerem necessários, a partir dos estudos e simulações, levando em consideração a viabilidade e o cumprimento da demanda da empresa, evitando o superdimensionamento e entregando o melhor custo-benefício.
- Breve descrição do servidor de telefonia IP utilizado pela empresa, o qual é baseado em Asterisk executando em uma distribuição Linux.
- Por fim são apresentados os testes e mensuração da qualidade dos acessos aos servidores e ao sistema de monitoramento CFTV, bem como das redes *mesh*.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS PRIMORDIAIS: TELECOMUNICAÇÕES E PROPAGAÇÃO

A transmissão por rádio pode ser comparada a uma conversa entre duas pessoas em uma sala barulhenta. O transmissor é como a pessoa que fala, o receptor é como a pessoa que ouve, e o meio de transmissão é como o ambiente ruidoso. Assim como na conversa humana, a transmissão por rádio depende da qualidade do transmissor e do receptor, bem como da clareza do ambiente, para que a mensagem seja transmitida com sucesso.

A partir do ponto em que a distância impede que a pessoa receptora consiga ouvir a mensagem transmitida, faz-se necessário o uso da telecomunicação. E, assim como as nuances da voz e da linguagem utilizadas na conversa entre pessoas, os protocolos e padrões de comunicação utilizados na transmissão por rádio são fundamentais para que a mensagem seja transmitida de forma clara e eficiente (15).

As ondas de rádio utilizadas em um enlace de micro-ondas são ondas eletromagnéticas que se propagam pelo espaço sem a necessidade de um meio físico. Essas ondas são geradas na antena transmissora e se propagam pelo ar até a antena receptora, onde são captadas e utilizadas para a recepção dos dados. Para que a transmissão ocorra com qualidade, é necessário que não haja obstáculos no caminho que possam obstruir a linha de visada, como prédios, árvores ou outras interferências que possam afetar a qualidade do sinal, o que é tratado na seção seguinte (16).

2.2 MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO

A propagação de ondas eletromagnéticas é um fenômeno complexo que ocorre de maneira diversificada, variando conforme a faixa de frequências empregada e a distância entre o transmissor e o receptor. Esse processo é influenciado por uma série de fatores, como as características do meio de transmissão, obstáculos físicos presentes no ambiente e até mesmo

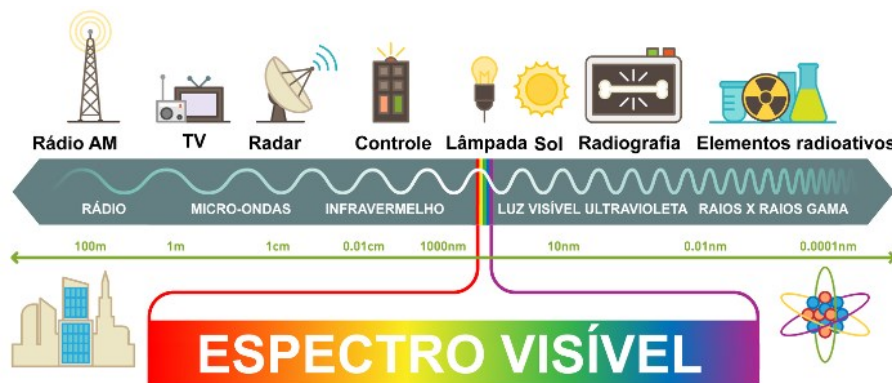
as condições atmosféricas. A compreensão desses mecanismos é crucial para projetar sistemas de comunicação eficazes e confiáveis, uma vez que cada faixa de frequência e cenário de operação apresenta desafios e oportunidades distintas. Esta seção se propõe a analisar em detalhes esses mecanismos e efeitos, auxiliando na formulação de estratégias que otimizem a propagação de sinais em diferentes contextos de telecomunicações.

2.2.1 Ondas Eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são uma forma de energia que se propaga pelo espaço, sem a necessidade de um meio físico. Elas são geradas pela oscilação de cargas elétricas e se movem em uma velocidade constante, que é igual à velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 3×10^8 m/s). No entanto, em meios materiais, a velocidade das ondas eletromagnéticas é reduzida, dependendo das propriedades do material em questão. As ondas eletromagnéticas possuem várias propriedades, como comprimento de onda, frequência, amplitude e polarização, que as tornam úteis para diversas aplicações, desde a comunicação sem fio até a medicina.

As ondas eletromagnéticas são classificadas de acordo com sua frequência, em ordem crescente, em ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios-x e raios gama. Cada uma dessas faixas possui características específicas e aplicações distintas, como apresenta a Figura 4 (17).

Figura 4 - Classificação das Ondas Eletromagnéticas.



Fonte: extraído de (17).

A velocidade de propagação está relacionada ao comprimento de onda pela Equação (2.1):

$$v = \lambda \cdot f \quad [m/s] \quad (2.1)$$

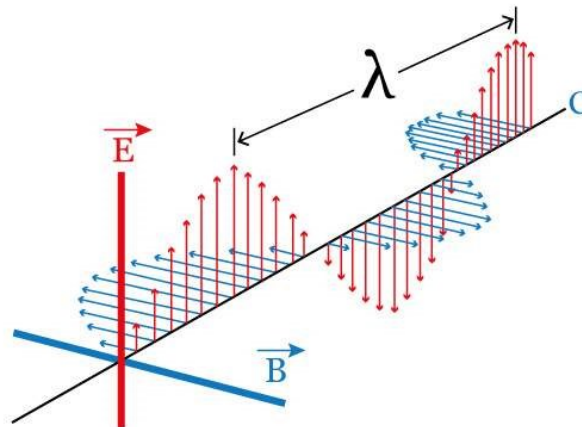
Em que:

- λ – Comprimento de onda [m]
- f – Frequência [Hz]

Quanto mais denso for o meio de propagação, menor será a velocidade das ondas eletromagnéticas.

Uma onda eletromagnética é uma forma de radiação composta por campos elétricos e magnéticos oscilantes que se propagam pelo espaço e possuem direção e sentido, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Ondas Eletromagnéticas.



Fonte: extraído de (16).

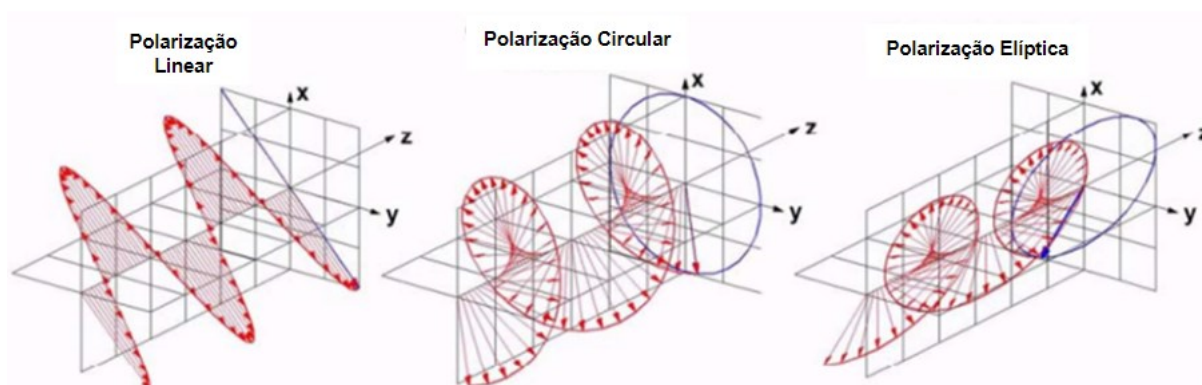
A polarização – maneira como os campos se orientam no espaço – é definida em função do campo elétrico sendo (10):

- **Polarização Linear Horizontal:** vetor do campo elétrico é paralelo à superfície da Terra;

- **Polarização Linear Vertical:** vetor do campo elétrico não possui componente paralela à superfície da Terra;
- **Polarização Elíptica:** vetor do campo elétrico descreve uma trajetória elíptica ao longo do tempo. A polarização elíptica é obtida pela combinação de duas ondas linearmente polarizadas com amplitudes e fases diferentes;
- **Polarização Circular:** vetor do campo elétrico gira em círculos ao longo do tempo. É alcançada pela combinação de duas ondas linearmente polarizadas de mesma amplitude e eletricamente defasadas de 90 graus.

Cada tipo de polarização, como as apresentadas na Figura 6, apresenta vantagens e desvantagens em diferentes situações, e a escolha da polarização a ser utilizada depende das condições do meio de transmissão e das necessidades da aplicação.

Figura 6 - Diferentes Tipos de Polarização da Onda Eletromagnética.



Fonte: Extraído de (18).

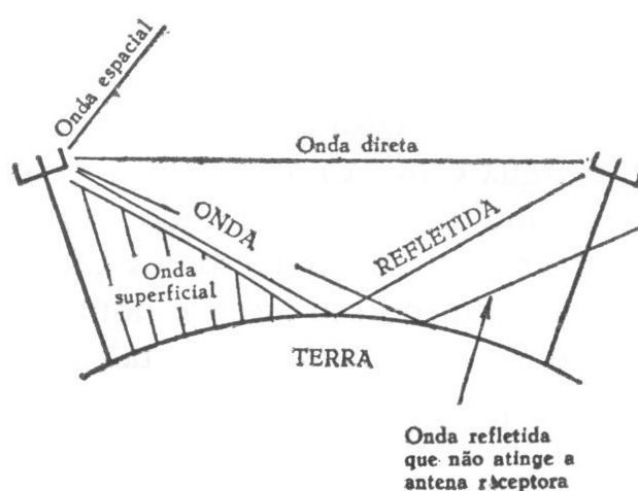
2.2.2 Meios de Transmissão

O meio de transmissão é formado pela superfície terrestre e a atmosfera. O sinal emitido pelo transmissor sofre interferências e variações devido ao relevo e obstáculos presentes no terreno, como montanhas, prédios e árvores, que podem difratar ou refletir as ondas. Além disso, as condições atmosféricas, como temperatura, umidade e pressão também afetam a

propagação do sinal. É importante considerar esses fatores ao projetar e implantar sistemas de comunicação para garantir a qualidade e a confiabilidade da transmissão.

A Figura 7 apresenta os vários caminhos que a portadora pode tomar no trajeto entre a antena transmissora e receptora. Quando todos esses sinais atingem a antena, eles são somados e o resultado pode prejudicar severamente o sinal original (10).

Figura 7 - Principais Mecanismos de Propagação.



Fonte: extraído de (10).

A atmosfera terrestre é dividida em três camadas, cada uma com suas características únicas (10):

- **Troposfera:** é uma camada adjacente à superfície terrestre e se estende até cerca de 11 km de altura. É composta principalmente por gases como oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono. Esses gases atmosféricos desempenham um papel crucial na atenuação e no traçado do raio de um sinal. A presença de elementos como vapor de água afeta a propagação das ondas. Nessa camada, a chuva é um fator importante que contribui para a atenuação do sinal em enlaces que operam em frequências acima de 10 GHz. Além disso, a troposfera também apresenta o efeito de refração, no qual a trajetória das ondas é afetada como resultado de uma variação na velocidade de propagação em função da altitude;
- **Estratosfera:** se estende de cerca de 11 km até aproximadamente 50 km de altitude, apresentando uma temperatura constante em torno de -50°C . Essa camada é

considerada estável para a propagação de sinais de rádio, no entanto, possui pouca relevância para as telecomunicações;

- **Ionosfera:** estende-se aproximadamente de 50 km até 350 km de altitude, sendo caracterizada por estar ionizada devido ao constante bombardeamento de partículas provenientes do Sol e raios cósmicos. O comportamento da ionosfera não é constante devido às variações nas radiações solares.

2.2.3 Tipos de propagação

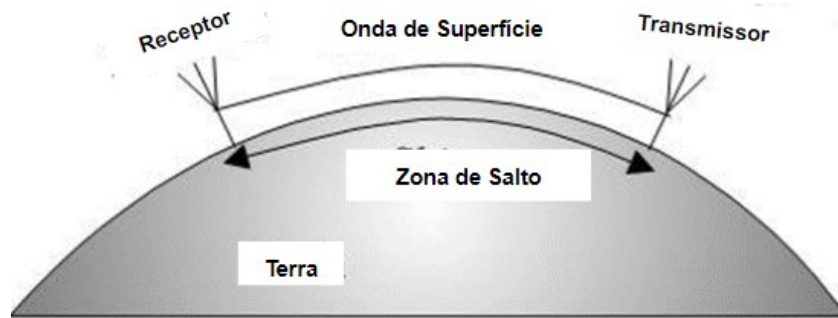
Na atmosfera, as ondas de rádio podem ser classificadas de várias maneiras, dependendo de como se propagam. A seguir é apresentada algumas das principais formas de propagação.

2.2.3.1 Ondas de Superfície

As ondas de superfície são aquelas que se propagam ao longo da superfície da Terra, seguindo sua curvatura. Elas são capazes de contornar obstáculos geográficos, como montanhas e edifícios altos e são frequentemente usadas em comunicações de longa distância em frequências de ondas médias e longas (16).

A Figura 8 apresenta uma característica que acontece em certas distâncias, onde as ondas de superfície não conseguem atingir o receptor diretamente, resultando na formação da *Skip Area* (Zona de Salto). Nessa região, a comunicação pode depender de outros mecanismos de propagação, como as ondas ionosféricas ou ondas refletidas por obstáculos naturais ou artificiais. A existência da zona de salto é um fator importante a ser considerado no planejamento de sistemas de comunicação utilizando ondas de superfície (18).

Figura 8 - Propagação das ondas de superfície (*Ground Wave*).

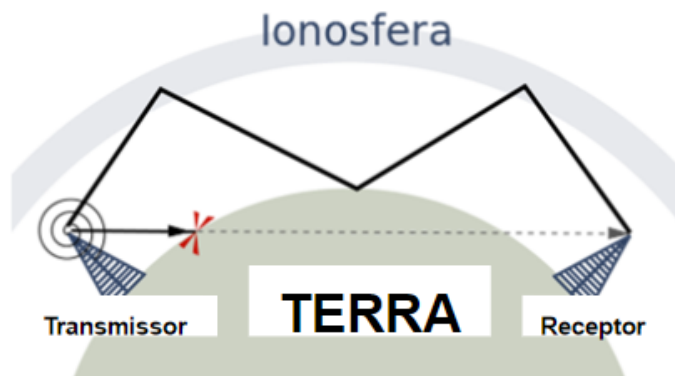


Fonte: extraído de (19).

2.2.3.2 Ondas Ionosféricas

As ondas ionosféricas são aquelas que se propagam pela ionosfera. Elas podem ser refletidas ou refratadas pela ionosfera, como é mostrado na Figura 9, permitindo a comunicação intercontinental sem necessidade de estações de repetição (16).

Figura 9 - Propagação de Ondas Ionosféricas.



Fonte: extraído de (20).

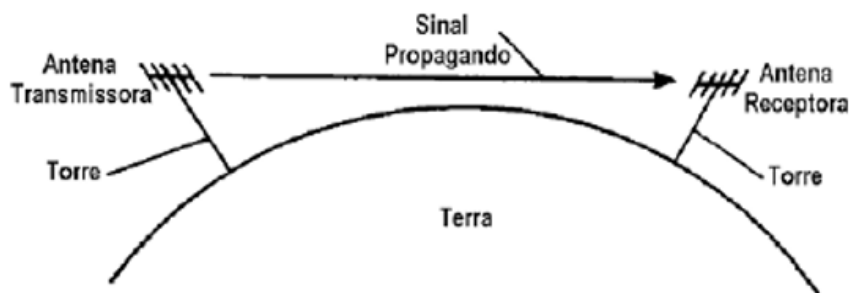
A propagação das ondas ionosféricas depende de vários fatores, incluindo a hora do dia, a estação do ano, a atividade solar e as condições ionosféricas. Durante o dia, a ionosfera é mais ionizada devido à exposição ao sol, o que leva a uma maior reflexão das ondas. À noite, a densidade eletrônica diminui, resultando em maior penetração das ondas na ionosfera.

Na propagação de longa distância, as ondas ionosféricas desempenham um papel crucial, permitindo a comunicação global e o alcance de áreas remotas. No entanto, a propagação das ondas ionosféricas é altamente variável e imprevisível, exigindo técnicas avançadas de modelagem e monitoramento para otimizar a comunicação nessas condições.

2.2.3.2 Ondas Diretas

Também chamadas de ondas de visada direta, são aquelas que se propagam sem sofrer reflexões ou desvios significativos. Elas são utilizadas em comunicações ponto a ponto, nos quais não há obstruções consideráveis entre as antenas transmissora e receptora (16).

Figura 10 - Propagação das ondas diretas.

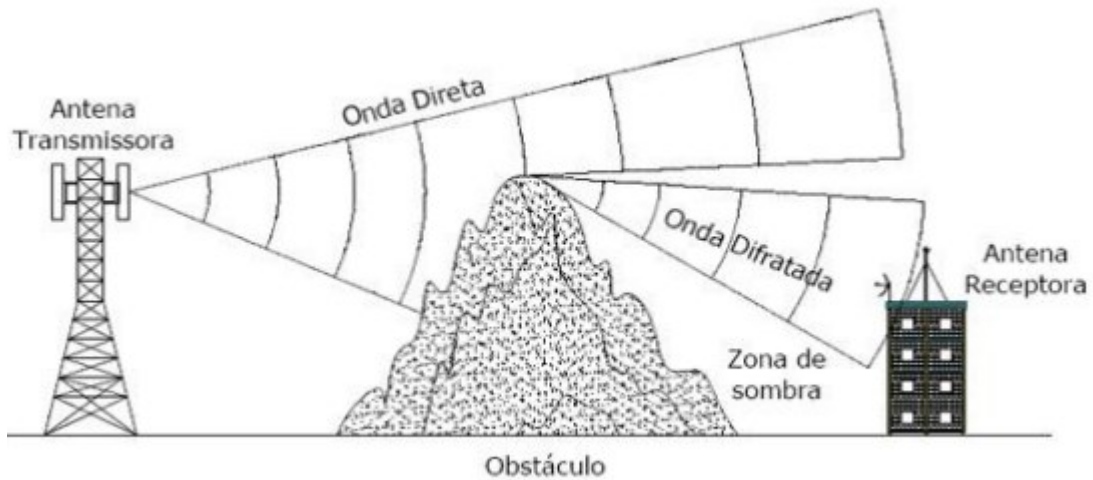


Fonte: extraído de (16).

2.2.3.3 Ondas Difractadas

As ondas difratadas são aquelas que contornam obstáculos, como bordas de edifícios ou montanhas, dobrando-se ao redor deles. Essas ondas permitem a comunicação em áreas sombreadas ou obstruídas, mas podem sofrer atenuação e distorção (16).

Figura 11 - Propagação das ondas difratadas.



Fonte: extraído de (16).

2.2.3.4 Ondas Espalhadas

As ondas espalhadas são aquelas que se dispersam em várias direções após encontrar obstáculos ou irregularidades no ambiente. Essas ondas podem ser utilizadas em comunicações não-direcionais, como o Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), em que os sinais se propagam por reflexões e dispersões múltiplas.

2.2.4 Faixas de Frequências

Os mecanismos de propagação variam em função da frequência de operação. A Tabela 1 a seguir apresenta a classificação e em seguida as aplicações de cada faixa no ramo das telecomunicações são mostradas resumidamente, e também representadas pela Figura 12 (10).

Tabela 1 – Faixas de Frequências

Faixa de Frequência	Comprimento de Onda	Denominação
300 Hz – 3 KHz	100 a 1000 Km	ELF – Extremely Low Frequency

3 KHz – 30 KHz	10 a 100 Km	VLF – Very Low Frequency
30 KHz – 300 KHz	1 a 10 Km	LF – Low Frequency
300 KHz – 3 MHz	100 m a 1 Km	MF – Medium Frequency
3 MHz – 30 MHz	10 a 100 m	HF – High Frequency
30 MHz – 300 MHz	1 a 10 m	VHF – Very High Frequency
300 MHz – 3 GHz	0.1 a 1 m	UHF – Ultra High Frequency
3 GHz – 30 GHz	10 a 100 mm	SHF – Super High Frequency
30 GHz – 300 GHz	1 a 10 mm	EHF – Extremely High Frequency

Fonte: o autor baseado em (10).

Características e aplicações:

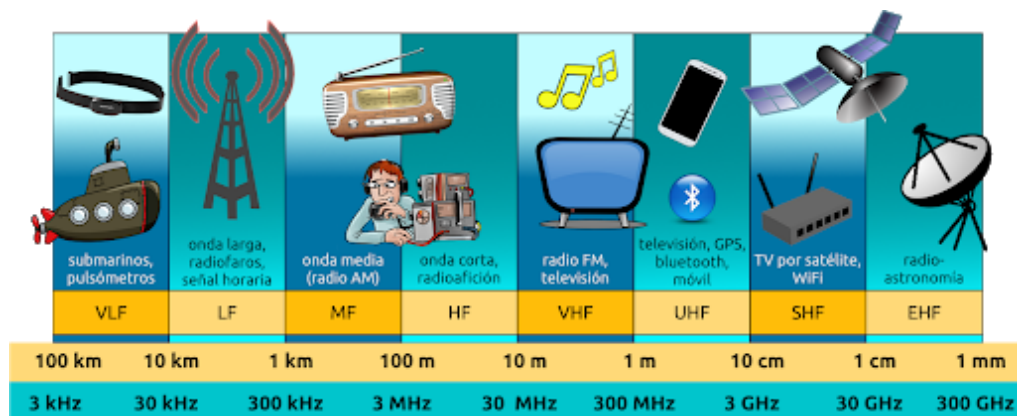
- **ELF:** As ondas penetram no solo e na água praticamente sem sofrerem interferências e são geradas utilizando transmissores de alta potência e grandes antenas. Usada para aplicações militares, comunicações submarinas, escavações de minas e estudos geofísicos;
- **VLF:** Nesta faixa é empregado a reflexão ionosférica como mecanismo de propagação e a ionosfera atua como camada condutora muito boa, que sofre pequenas atenuações pelo trajeto. É utilizada para comunicações submarinas, sistemas de navegação de longo alcance e estudos científicos;
- **LF:** Também emprega a reflexão ionosférica, porém com maior atenuação que na VLF. É usada em sistemas de navegação de baixa frequência e comunicações submarinas;
- **MF:** Utiliza o mecanismo de onda de superfície, apresentando menor atenuação do que o de reflexão ionosférica. É amplamente aplicada em transmissões de rádio AM (*Amplitude Modulation*), comunicações de aviação civil e serviços de radiodifusão local;
- **HF:** Nesta faixa faz-se o uso do mecanismo de refração ionosférica, sendo que em regiões mais próximas do transmissor ainda se emprega o de ondas de superfície. É usada em comunicações de longa distância por ondas curtas, rádio amador, aviação militar e rádio táxi;
- **VHF:** emprega-se a propagação em visibilidade, uma vez que as antenas permitem focalizar as ondas, além disso ondas nessa faixa sofrem menos com a influência do

terreno. É comumente utilizada em transmissões de rádio FM, televisão terrestre, enlaces de telefonia, comunicações de aviação civil e serviços de radiodifusão regional;

- **UHF:** Empregada em transmissões de televisão digital, telefonia móvel, comunicações de aviação e sistemas de comunicação sem fio de curto alcance;
- **SHF:** Usada em comunicações via satélite, radar de curto alcance, sistemas de comunicação móvel e redes sem fio de alta velocidade;
- **EHF:** Utilizada em comunicações via satélite, experimentos científicos, pesquisa espacial e sistemas de radar de alta resolução.

Vale ressaltar que as faixas de VHF e UHF estão muito saturadas, devido a utilização não somente em radioenlace como também em outros serviços, além de serem mais vulneráveis a ruídos ambientais. Nessas faixas é possível trabalhar com enlaces parcialmente obstruídos, o que significa que obstáculos como prédios e vegetação podem estar presentes sem prejudicar significativamente a comunicação. No entanto, nas faixas SHF e EHF, é necessária a visada direta entre os terminais, o que implica em torres de transmissão mais altas para garantir o alcance desejado. Essa necessidade de visada direta se deve ao fato de que frequências mais altas têm menor capacidade de contornar obstáculos, exigindo uma linha de visão mais clara entre os pontos de transmissão e recepção.

Figura 12 - Aplicações das faixas de frequência.



Fonte: extraído de (21).

O elipsoide de Fresnel é diretamente impactado pela escolha da frequência, como pode ser visto na Seção 2.2.5.

2.2.5 Zona ou Elipsoide de Fresnel

A teoria do elipsoide de Fresnel é uma parte importante do estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em enlaces de comunicação sem fio. A teoria foi desenvolvida por Augustin-Jean Fresnel, um físico e engenheiro francês, no século XIX.

Fresnel estava interessado em entender como as ondas de luz se comportavam ao se propagarem através do espaço. Ele observou que quando a luz passava por aberturas ou ao redor de obstáculos, ocorriam fenômenos de interferência, difração e polarização, que afetavam a qualidade e a direção do feixe de luz.

Ao estudar esses fenômenos, Fresnel formulou a teoria do elipsoide de Fresnel. Essa teoria descreve a forma geométrica da região em torno do caminho de propagação onde as ondas eletromagnéticas se encontram em fase, o que é fundamental para a propagação eficiente do sinal.

Fresnel percebeu que a zona em forma de elipse, conhecida como zona de Fresnel, era essencial para garantir a propagação adequada das ondas. Ele desenvolveu equações matemáticas para calcular a forma e o tamanho dessa zona, levando em consideração a frequência do sinal, a distância do enlace e outros parâmetros relevantes.

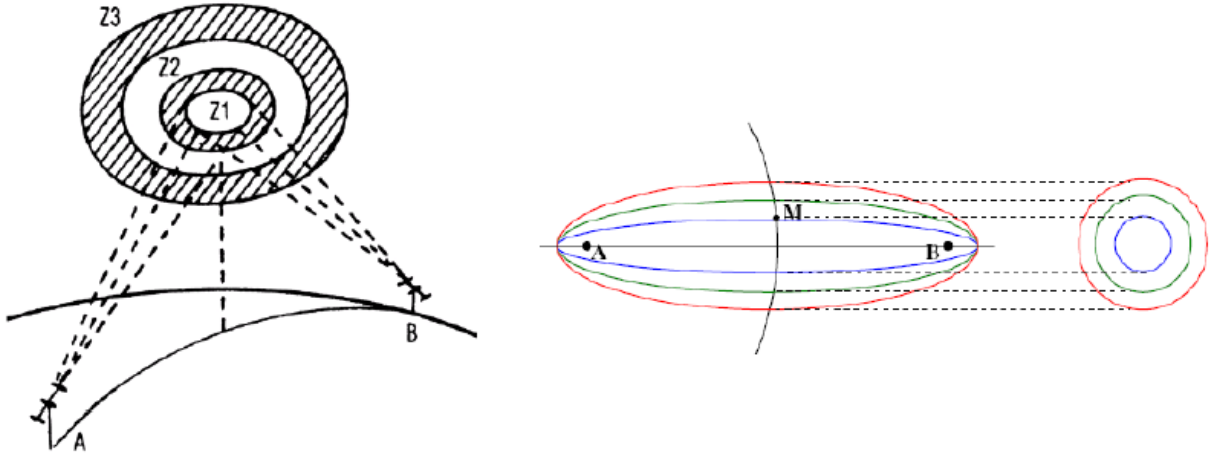
Considerando uma ligação via rádio entre dois pontos A e B, o espaço entre essas duas localidades pode ser subdividido em uma família de elipsoides, todos eles com pontos focais em A e B – como apresentado pela Figura 13 – de forma que qualquer ponto M de uma elipsoide satisfaz a relação mostrada na Equação 2.2 (10):

$$AM + MB = AB + n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

Em que:

- n – número inteiro caracterizando a ordem da elipsoide, onde $n = 1$ corresponde ao primeiro elipsoide de Fresnel.
- λ – Comprimento de onda [m]

Figura 13 - Aspectos das zonas de Fresnel numa ligação troposférica entre estação A e B.



Fonte: extraído de (22).

Um enlace é considerado com visada direta (i.e., difração desprezível) se não existir nenhum obstáculo dentro da primeira zona de Fresnel (10).

O raio da n -ésima zona de Fresnel é dado pela Equação 2.3-A:

$$r_n = \left[\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2} \quad [m] \quad (2.3-A)$$

Ou, calculando a partir da frequência no lugar do comprimento de onda, pela Equação 2.3-B:

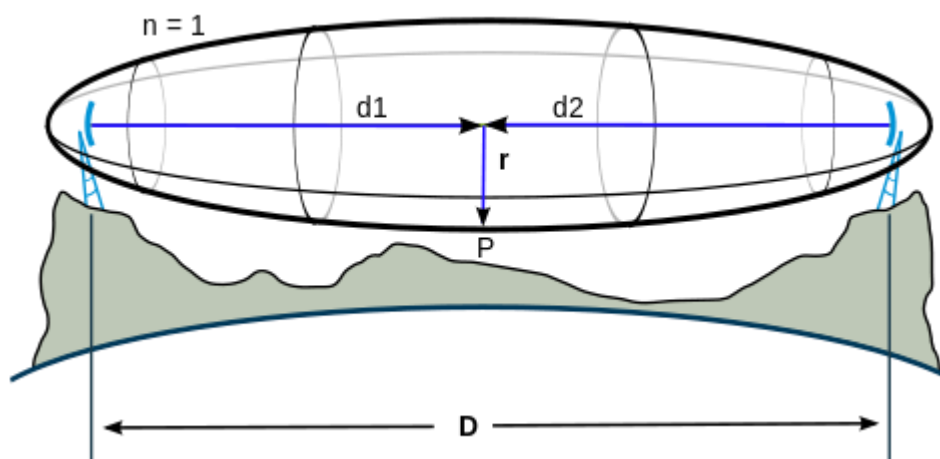
$$r_n = 550 \cdot \left[\frac{n \cdot d_1 \cdot d_2}{(d_1 + d_2) \cdot f} \right]^{1/2} \quad [m] \quad (2.3-B)$$

Em que:

- d_1 e d_2 – distâncias entre o transmissor e o receptor em relação ao obstáculo [m].

A Figura 14 mostra uma transmissão em visada direta com um Elipsóide de Fresnel contendo as características citadas.

Figura 14 - D é a distância entre o transmissor e o receptor; r é o raio da primeira zona de Fresnel ($n=1$) no ponto P . P está a uma distância d_1 do transmissor, e d_2 do receptor.



Fonte: extraído de (23).

É mostrado ao longo dessa monografia como o dimensionamento da altura das torres e das antenas é baseado no cálculo da percentagem de liberação da primeira zona de Fresnel e perdas pelo meio de transmissão, a qual tem impacto direto no nível de recepção do sinal, que é comumente medida em Decibel.

2.2.6 Decibel

Decibel (dB) é uma unidade de medida amplamente utilizada na área de telecomunicações e eletrônica para expressar relações de potência, ganho ou perda em um sistema. Essa escala logarítmica fornece uma maneira eficaz de representar uma ampla gama de valores de potência de maneira mais conveniente e compacta do que simplesmente expressar valores absolutos em watts.

Algumas regras de suas terminologias são abordadas pelo ITU-R V.574-5 (24):

- **Símbolo dB sem indicação adicional:** deve ser usado para indicar a razão de duas potências, duas densidades de potência, duas outras quantidades claramente relacionadas com a potência ou a diferença entre dois níveis de potência;

- **Símbolo dB com informação adicional entre parênteses:** deve ser usado para expressar um nível absoluto de potência, densidade de fluxo de potência ou qualquer outra quantidade claramente relacionada à potência, em relação a um valor de referência dentro dos parênteses;
- **Símbolo dB com informação adicional sem parênteses:** deve ser usado, por convenção, para expressar condições especiais, como medições através de filtros especificados ou em um ponto especificado de um circuito.

2.2.7 Propagação e Perda no Espaço Livre

No espaço livre, as ondas de rádio se propagam em linha reta sem a ocorrência de fenômenos como refração e reflexão. De acordo com a Recomendação ITU-R P. 525-4, a perda no espaço livre é calculada pela Equação 2.4-A (10):

$$L_{bf} = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot D}{\lambda}\right) \quad [dB] \quad (2.4-A)$$

Em que:

- D – Distância entre o transmissor e o receptor.

Obs.: A distância e o comprimento de onda devem ser expressos na mesma unidade.

Utilizando frequência no lugar do comprimento de onda temos as Equações 2.4-B e 2.4-C:

$$L_{bf} = 32,44 + 20 \log(f) + 20 \log(D) \quad [dB] \quad (2.4-B)$$

$$L_{bf} = 92,45 + 20 \log(f) + 20 \log(D) \quad [dB] \quad (2.4-C)$$

Obs.: Distância em km e frequência em MHz para 2.4-B e GHz para 2.4-C.

2.3 DESVANECIMENTO PLANO E SELETIVO

Um feixe de micro-ondas, ao atravessar o meio de transmissão, pode sofrer alterações tanto em sua amplitude quanto em seu percurso, percebidas como atenuações, reforços e distorções no espectro do sinal - alterações chamadas de desvanecimento (10).

O desvanecimento pode ser classificado em duas categorias principais:

- **Plano:** refere-se à variação uniforme da amplitude do sinal ao longo do tempo. Esse fenômeno ocorre devido às interferências construtivas e destrutivas que ocorrem durante a propagação do sinal. Pode ser causado por diversos fatores, como múltiplos caminhos percorridos pelo sinal, reflexões, difrações e interferências atmosféricas. O desvanecimento plano pode resultar em perdas significativas de sinal, afetando a qualidade e a confiabilidade da comunicação;
- **Seletivo:** refere-se às variações não uniformes do espectro do sinal, ou seja, diferentes frequências do sinal podem sofrer atenuações ou reforços de forma seletiva. Esse tipo de desvanecimento é mais comum em ambientes urbanos ou em áreas com obstáculos que causam múltiplas reflexões e espalhamentos do sinal. O desvanecimento seletivo pode causar distorções no sinal, afetando a capacidade de transmissão e a qualidade dos dados.

Na Tabela 2, podemos ver como se relacionam cada causa e cada efeito na onda, resultando em cada tipo de desvanecimento.

Tabela 2 – Tipos/Causas de Desvanecimento.

C \ T	Plano	Seletivo
Absorção	Atenuação por dissipação (chuva)	-
Obstáculos	Atenuação por obstrução	-
Dutos	Atenuação por divergência ou convergência (atenuação negativa) ou região cega	Interferência devido ao multipercurso provocando interferência inter-simbólica

Reflexão	-	Interferência por multipercurso
----------	---	---------------------------------

Fonte: autor baseado em (10).

2.4 REFRAÇÃO

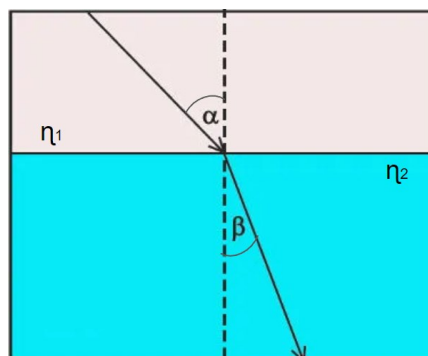
Refração é um fenômeno de alteração de direção de uma onda que ocorre quando penetra em outro meio, como representa a Figura 15 (10).

O ângulo formado entre a normal à fronteira entre os meios e o raio refratado é chamado de ângulo de refração β , relacionado ao ângulo de incidência α pelo índice de refração n de cada meio. A Equação 2.5 é conhecida como Lei de Snell:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.5)$$

Em que: $n = \frac{c}{v}$, sendo c a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade no meio a ser estudado.

Figura 15 - Refração da onda ao passar de um meio para outro.



Fonte: o autor.

2.4.1 Refração das Ondas de Rádio na Atmosfera

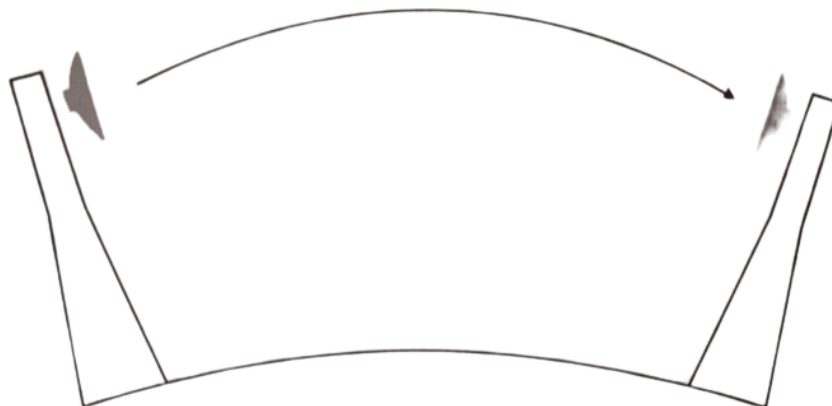
A refração atmosférica é um fenômeno que ocorre quando as ondas eletromagnéticas atravessam diferentes camadas da atmosfera terrestre. Essa variação no índice de refração do ar causa mudanças na direção e velocidade de propagação das ondas, resultando na refração.

Essa mudança na direção do feixe pode levar a problemas de alinhamento entre as antenas transmissoras e receptoras, causando perda de sinal ou diminuição da qualidade da transmissão. Em casos extremos, a refração atmosférica pode até mesmo ocasionar a perda total do sinal em radioenlace.

As ondas de rádio para faixa de UHF e SHF, com exceção dos satélites, têm seus percursos confinados na troposfera, sendo necessário estudo do índice de refração da troposfera (10).

Sabendo que o índice de refração do ar geralmente diminui com a altitude, toda onda de rádio - UHF e SHF - lançada na atmosfera faz um arco descendente, como o da Figura 16, já que a onda tende a voltar para um meio com índice de refração maior.

Figura 16 – Trajetória do sinal de rádio



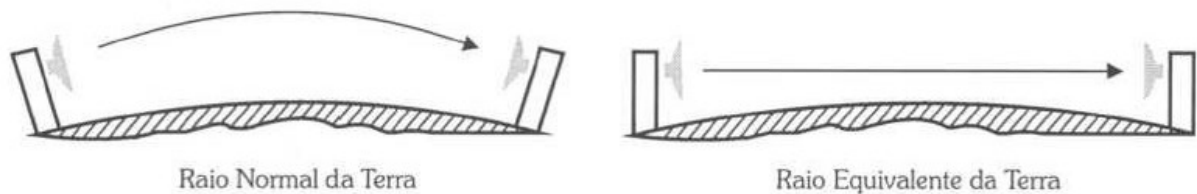
Fonte: extraído de (10).

Para uma análise mais próxima do real da trajetória percorrida pelas ondas eletromagnéticas emitidas pelo rádio, deve-se fazer o estudo considerando os efeitos do raio da Terra.

2.4.2 Raio Terrestre Equivalente

Para analisar a propagação das ondas de rádio na atmosfera, usa-se o artifício de considerar o feixe sem curvatura, aumentando o raio da Terra. O novo raio da Terra é chamado de equivalente, como pode ser verificado na Figura 17 (10).

Figura 17 - Raio equivalente da Terra.



Fonte: extraído de (10).

Os valores usados para considerar o raio equivalente são extraídos das recomendações P.310 e P.530 do ITU-R. A chamada correção de curvatura da Terra é realizada com a aplicação do fator K (10).

O fator K pode ser definido em função do gradiente $\left(\frac{dn}{dh}\right)$ do índice de refração (n) e do raio da Terra (a), conforme a Equação 2.6:

$$K = \frac{1}{1 + a \cdot \frac{dn}{dh}} \quad (2.6)$$

Em que:

- a – Raio da Terra igual à $6,37 \times 10^6$.
- $\frac{dn}{dh} \cong -0,039 \times 10^{-6}$.

Substituindo os termos na Equação 2.6 obtemos o valor numérico de K:

$$K = \frac{1}{1 + [6,37 \times 10^6 \cdot (-0,039 \times 10^{-6})]} \approx 1,33 \approx \frac{4}{3}$$

O valor do fator $K = 4/3$ é definido para a atmosfera padrão como uma média no índice de refração na atmosfera, também chamado de $K_{\text{médio}}$. É importante destacar que o fator K pode variar devido às mudanças na pressão, umidade e temperatura da atmosfera (10).

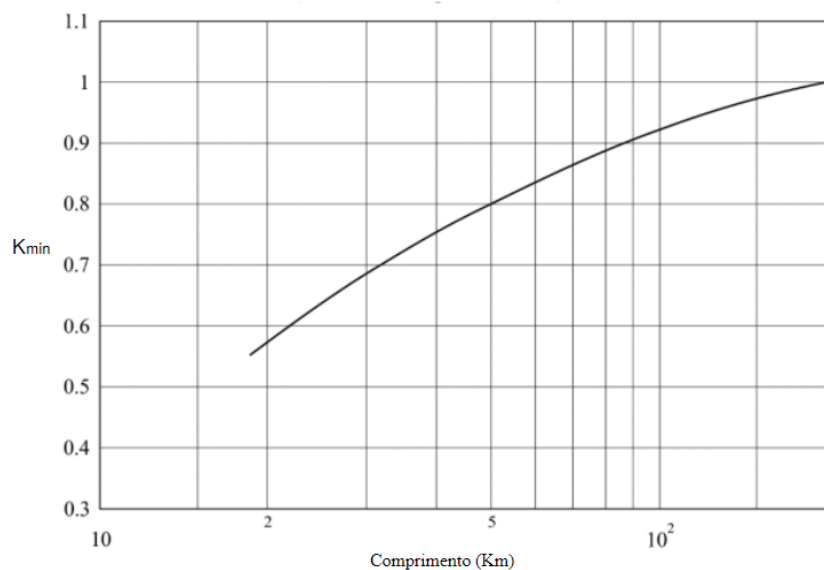
Para projetar radioenlaces, o projetista deve sempre corrigir o perfil da Terra aplicando dois fatores K , sendo o $K_{\text{médio}}$ para atmosfera padrão e outro que se chama $K_{\text{mínimo}}$ cujo valor é determinado de acordo com a recomendação ITU-R. P.530 pela Equação 2.7, variando em função do comprimento do enlace conforme o gráfico da Figura 18. Ele é utilizado levando em conta condições climáticas desfavoráveis, considerando um tempo de operação de 99,9% no pior mês do ano [10].

$$K_{\text{min}} = \frac{157}{144 + \frac{2670}{d}} \quad (2.7)$$

Em que “ d ” é a distância do enlace.

A utilização do $K_{\text{mínimo}}$ é especialmente importante quando ocorre sub-refração na atmosfera, o que significa que o gradiente de refratividade é positivo. Nesses casos, a curvatura das ondas tende a fazer um arco ascendente, exigindo uma correção no raio da Terra. Isso é feito através da redução dos valores de K abaixo de um (10).

Figura 18 - Valor de K excedido para 99,9% do tempo no pior mês do ano (clima continental temperado).



Fonte: extraído de (25).

2.4.3 Dutos

A formação dos chamados “dutos” ocorre pelo fenômeno da inversão térmica, cuja temperatura aumenta com a altitude. Isto acontece quando uma camada de ar quente fica acima de uma fria. Este fenômeno atmosférico possui sentido paralelo à superfície da Terra e pode atingir dezenas de quilômetros, sendo capaz de alterar o curso de um feixe de ondas (16).

Nos dutos atmosféricos, podem ocorrer dois tipos de desvanecimento espectral: desvanecimento plano e desvanecimento seletivo. O desvanecimento plano refere-se à atenuação geral do sinal devido à convergência e divergência das ondas dentro do duto. Essas variações na intensidade do sinal podem resultar em perdas de potência ao longo da trajetória de propagação. No entanto, é importante ressaltar que em certas situações de convergência, pode ocorrer uma atenuação negativa, também conhecida como desvanecimento negativo, em que ocorre um reforço do sinal ao invés de sua atenuação (10).

Além do desvanecimento, os dutos atmosféricos também podem gerar interferências devido à formação de múltiplos caminhos de propagação, resultado das reflexões e refrações das ondas nas camadas de inversão térmica presentes no duto. As variações de densidade e temperatura ao longo dessas camadas podem causar desvios na trajetória das ondas, resultando em interferências e distorções nos sinais transmitidos (10).

É importante destacar que os dutos atmosféricos não são fenômenos estáticos, pois estão sujeitos a mudanças e variações ao longo do tempo e do espaço. As condições meteorológicas, como temperatura, umidade e pressão, desempenham um papel fundamental na formação e na dissipação dos dutos (10).

2.5 DIFRAÇÃO

A difração é um fenômeno fundamental na propagação de ondas eletromagnéticas, que ocorre quando essas ondas encontram um obstáculo ou uma abertura em seu caminho. Ao encontrar uma borda, canto ou objeto, as ondas se curvam e se espalham ao redor do obstáculo, contornando-o e se difundindo em diferentes direções. A difração é mais notável quando o

tamanho do obstáculo ou abertura é da mesma ordem de grandeza ou menor do que o comprimento de onda das ondas envolvidas (10).

2.5.1 Estimativa de Perda por Difração

A Recomendação ITU-R P.526 e P.530 apresentam as diretrizes básicas para a estimativa das perdas por difração. Uma vez que são cálculos mais avançados e extensos, será apresentado apenas uma breve descrição dos tipos de obstáculos. Durante o desenvolvimento e metodologia é utilizada a ferramenta avançada Pathloss para o cálculo das perdas de percurso.

Existem vários tipos de obstáculos que precisam ser considerados na estimativa das perdas por difração, são eles (10):

- **Terra Suave (*Smooth Earth*):** Este modelo é usado quando se lida com terrenos planos e suaves, onde não existem obstáculos significativos. Ele assume que o terreno é homogêneo e possui uma superfície contínua e suave, sem elevações ou variações notáveis;
- **Obstáculo Gume de Faca (*Knife Edge*):** Esse tipo de obstáculo é encontrado em várias situações, como estruturas, edifícios ou montanhas com bordas afiadas. Quando as ondas eletromagnéticas encontram uma borda aguda, a difração é mais acentuada em comparação a obstáculos com bordas arredondadas. Isso ocorre porque a borda afiada causa um desvio mais significativo das frentes de onda, levando a uma maior difusão do campo eletromagnético;
- **Obstáculo Isolado:** Esse modelo expande a ideia do obstáculo em forma de gume de faca, levando em consideração a largura do obstáculo ao longo do caminho. Nesse caso, é importante estimar o raio do obstáculo;
- **Mais de um Obstáculo:** Quando existem dois ou mais obstáculos ao longo do caminho, o perfil do terreno deve ser subdividido em segmentos para permitir o cálculo individual das perdas;

- **Terreno Irregular:** Em alguns cenários, obstáculos irregulares formam uma cadeia contínua, o que torna difícil a subdivisão em obstáculos isolados. Nesses casos, a perda é estimada pela média ponderada entre o valor da perda para obstáculo em forma de gume de faca e o valor de perda para "Terra Suave";
- **Perdas Adicionais:** Quando existem elevações sobre obstáculos críticos, como árvores ou edifícios, perdas adicionais precisam ser consideradas. Essas perdas, frequentemente relacionadas à vegetação, são complexas de calcular e são tratadas pela Recomendação P.833-10 da ITU-R.

2.6 REFLEXÃO

A reflexão é a modificação da direção de propagação de uma onda que incide sobre uma interface que separa dois meios diferentes e retorna para o meio inicial. Ocorre normalmente em enlaces com excesso de visada, pois nessas condições as ondas eletromagnéticas podem atingir a interface de forma mais direta, ou seja, sem sofrer desvios ou obstruções no percurso. Isso aumenta a probabilidade de que a onda incida sobre a interface com ângulos adequados para ocorrer a reflexão. (10).

Quando ocorre a reflexão, surgem múltiplos caminhos percorridos pelos raios da onda, resultando em interferência na recepção devido aos diferentes comprimentos desses caminhos. Existem dois tipos de reflexões: as que ocorrem nas camadas atmosféricas, que são temporárias e variam de posição conforme o deslocamento dessas camadas, e as que ocorrem no solo, que são permanentes e acontecem em pontos específicos ao longo do terreno (10).

Quando as reflexões ocorrem em áreas muito planas do solo, pode ocorrer uma atenuação significativa do sinal na recepção, dependendo da diferença de fase entre os raios refletidos. Para minimizar esses efeitos, podem ser utilizados equalizadores adaptativos ou técnicas de diversidade de espaço (10).

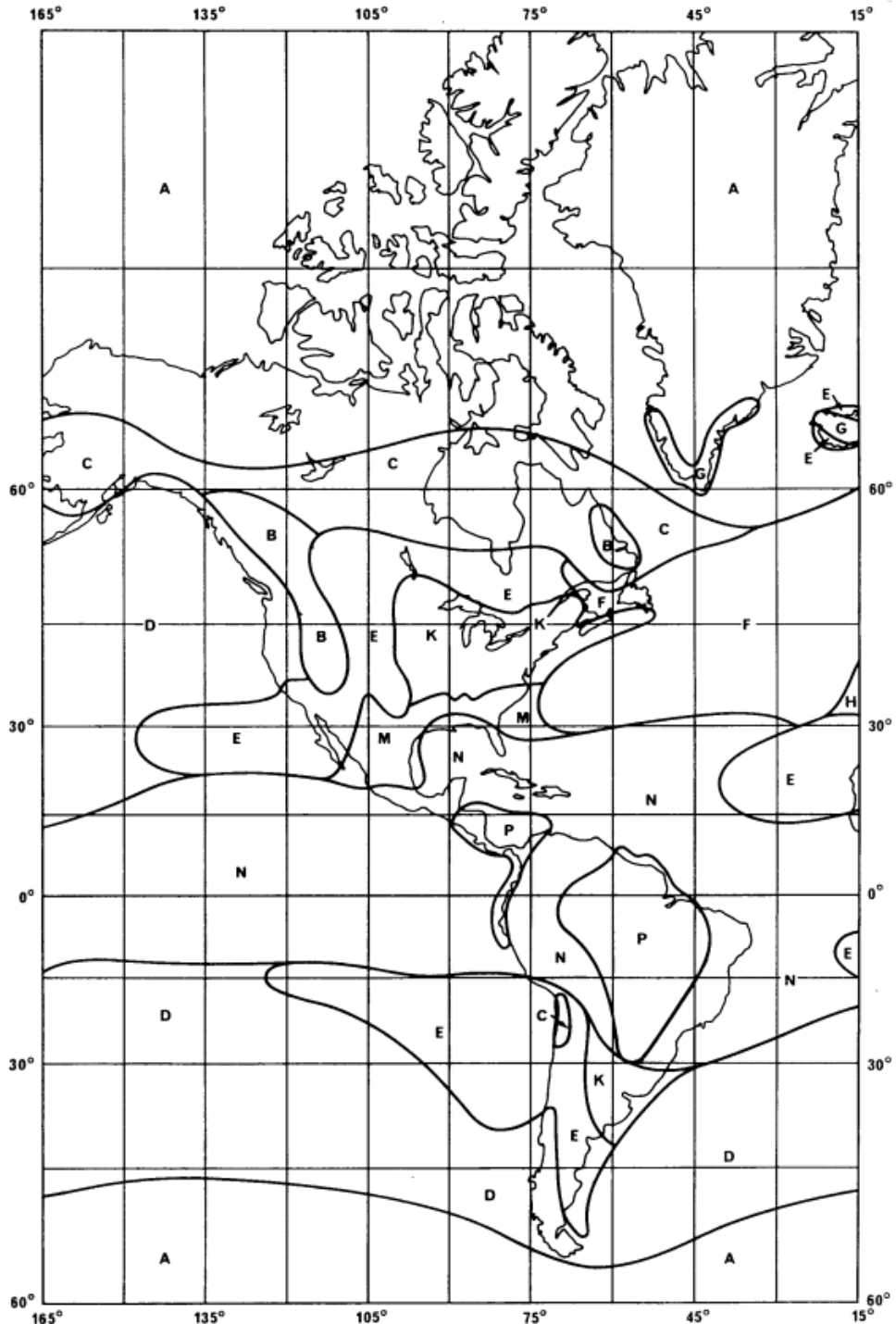
2.7 ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVAS

Nos projetos de enlaces de rádio, a atenuação devido à chuva é um fator limitante que está diretamente relacionado à frequência utilizada. Quanto maior a frequência, maior a atenuação causada pela chuva. Isso é especialmente crítico para enlaces que operam em frequências acima de 10 GHz, o que acaba restringindo a viabilidade de enlaces de longa distância (10).

A taxa de precipitação pluviométrica é o parâmetro principal utilizado para calcular as interrupções causadas pelos desvanecimentos devido à chuva. A ITU-R, através da coleta de dados de diversas regiões ao redor do mundo, compilou informações para criar um mapa global da distribuição da taxa de precipitação pluviométrica, o qual pode ser conferido na Figura 19 (10).

Observa-se pela Figura 19 que o Brasil faz parte das regiões P e N, as quais correspondem as taxas pluviométricas de 145 mm/h e 95 mm/h respectivamente para 0.01% do ano – aproximadamente 53 minutos.

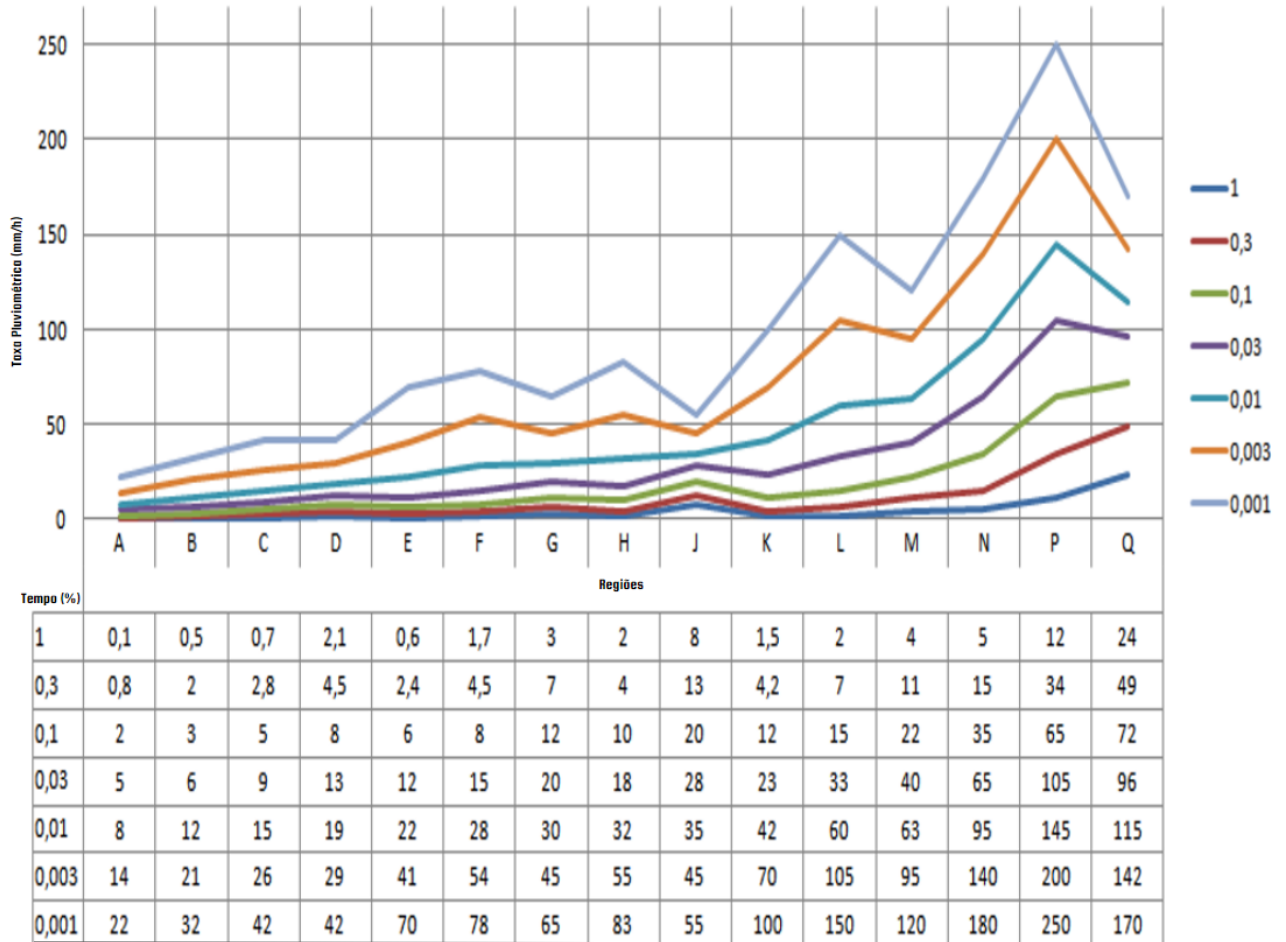
Figura 19 - Distribuição mundial da taxa pluviométrica.



Fonte: extraído de (26).

Através do gráfico da Figura 20 podemos concluir que as regiões definidas pela ITU a qual o Brasil faz parte são as com maiores taxas pluviométricas, causando degradações consideráveis nos serviços de telecomunicações (10).

Figura 20 - Taxas pluviométricas por região para várias porcentagens de tempo.



Fonte: extraído de (27).

Para o cálculo do impacto das chuvas no radioenlace projetado é utilizado os métodos da ITU discutidos na Seção 2.7.1.

2.7.1 Método do ITU-R P.838-3 e P.530-18

Os métodos ITU-R P.838-3 e P.530-18 são amplamente utilizados para calcular a atenuação causada pela chuva em enlaces de rádio (10).

O primeiro passo é obter a taxa pluviométrica que é excedida em apenas 0,01% do tempo ao longo de um ano. Em seguida, é necessário calcular a "atenuação específica", dadas pelas Equações 2.8, que representam a atenuação por quilômetro causada pela chuva. Essa atenuação

é influenciada pela frequência utilizada, pela polarização do sinal e pela taxa pluviométrica (10):

$$\text{Polarização Vertical: } \gamma_{RV} = K_V \cdot R^{\alpha_V}; \quad (2.8-A)$$

$$\text{Polarização Horizontal: } \gamma_{RH} = K_H \cdot R^{\alpha_H}; \quad (2.8-B)$$

$$\text{Polarização Circular: } \gamma_{RC} = \frac{\gamma_{RV} + \gamma_{RH}}{2}; \quad (2.8-C)$$

$$\text{Polarização Elíptica: } \gamma_{RE} = \epsilon \cdot \gamma_{RC} + (1 - \epsilon) \cdot \gamma_{RV}; \quad (2.8-D)$$

Em que:

- R – Taxa pluviométrica para 0,01% do tempo (mm/h), pode ser consultado na Figura 19;
- K_V, K_H – Coeficientes dependentes da estrutura da chuva, pode ser consultado na Figura 20;
- α_H, α_V – Coeficientes dependentes da estrutura da chuva, pode ser consultado na Figura 20;
- ϵ – Grau de elipticidade calculado por: $\epsilon = \frac{\gamma_{RV} - \gamma_{RH}}{\gamma_{RV} + \gamma_{RH}}$.

Os valores para os coeficientes dependentes da estrutura da chuva são fornecidos pela recomendação ITU-R P.838 da Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes dependentes de frequência para estimar a atenuação específica de chuva.

Frequência (GHz)	K_h	K_V	α_h	α_v
1	0,0000259	0,0000308	0,9691	0,8592
1,5	0,0000443	0,0000574	1,0185	0,8957
2	0,0000847	0,0000998	1,0664	0,9490
2,5	0,0001321	0,0001464	1,1209	1,0085
3	0,0001390	0,0001942	1,2322	1,0688

3,5	0,0001155	0,0002346	1,4189	1,1387
4	0,0001071	0,0002461	1,6009	1,2476
5	0,0002162	0,0002428	1,6969	1,5317
6	0,0007056	0,0004878	1,5900	1,5728
8	0,004115	0,003450	1,3905	1,3797
10	0,01217	0,01129	1,2571	1,2156
12	0,02386	0,02455	1,1825	1,1216
15	0,04481	0,05008	1,1233	1,0440
20	0,09164	0,09611	1,0568	0,9847
25	0,1571	0,1533	0,9991	0,9491
30	0,2403	0,2291	0,9485	0,9129
35	0,3374	0,3224	0,9047	0,8761
40	0,4431	0,4274	0,8673	0,8421
45	0,5521	0,5375	0,8355	0,8123
50	0,6600	0,6472	0,8084	0,7871
60	0,8606	0,8515	0,7656	0,7486
70	1,0315	1,0253	0,7345	0,7215
80	1,1704	1,1668	0,7115	0,7021
90	1,2807	1,2795	0,6944	0,6876
100	1,3671	1,3680	0,6815	0,6765
120	1,4866	1,4911	0,6640	0,6609
150	1,5823	1,5896	0,6494	0,6466

Fonte: extraída de (28).

2.7.2 Distância Efetiva do Enlace

O parâmetro “r” define, pela Equação 2.9, o percentual do enlace em que deve haver chuva (10):

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (2.9)$$

Em que:

- d – Distância do enlace (km);
- $d_0 = 35e^{-0.015R_{0.01}}$ (km);
- $R_{0.01}$ – Taxa pluviométrica para 0,01% do tempo.

Obs.: Caso $R_{0.01} > 100$ mm/h, deve-se usar na fórmula de d_0 o valor de 100mm/h (10).

Portanto, é importante ressaltar que a chuva não é considerada como ocorrendo simultaneamente com a mesma intensidade ao longo de todo o enlace. Dito isso, é necessário determinar o diâmetro efetivo da célula de chuva a partir da Equação 2.10 (10):

$$d_{eff} = r \cdot d \quad [km] \quad (2.10)$$

Por fim, a atenuação total devido à chuva é obtida pela Equação 2.11:

$$A_R = \gamma_R \cdot d_{eff} \quad [dB] \quad (2.11)$$

2.8 ATENUAÇÃO CAUSADA PELOS GASES ATMOSFÉRICOS

Em essência, essa atenuação é resultado da presença de dois elementos na atmosfera: o oxigênio e o vapor d'água. A atenuação total resultante é relativamente baixa, na faixa de décimos de decibéis, o que não causa impacto significativo no desempenho do enlace.

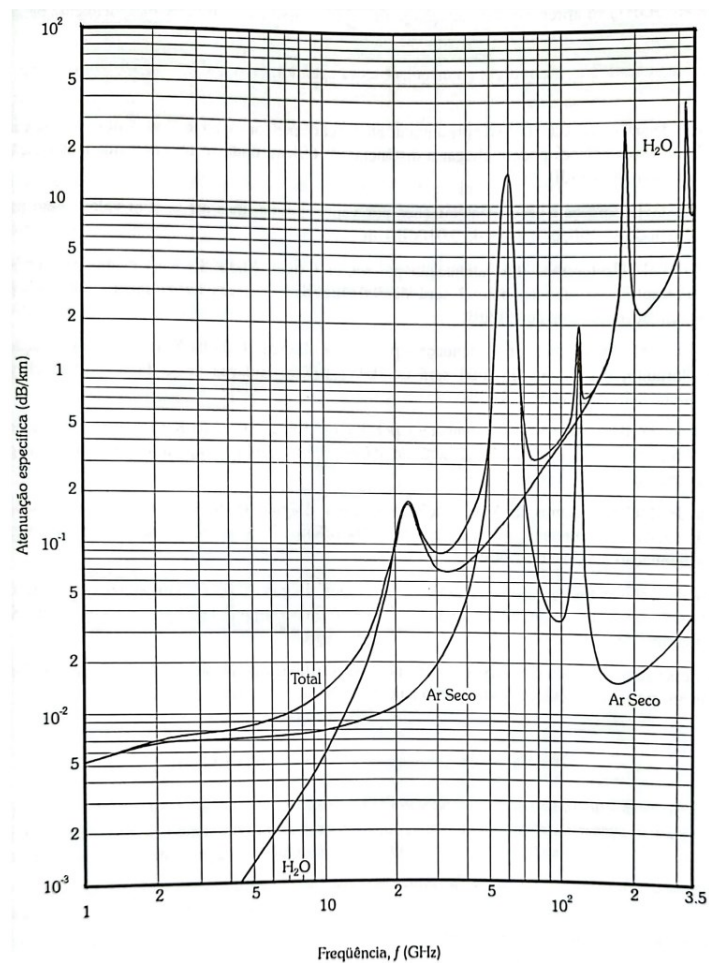
A atenuação pode ser calculada pela Equação 2.12:

$$A_{ab} = (\gamma_o + \gamma_w) \cdot d \quad [dB] \quad (2.12)$$

Em que:

- d – Distância do enlace (km);
- γ_o – Absorção devido ao oxigênio obtido pela Figura 21 (dB/Km);
- γ_w – Absorção devido ao vapor d'água obtido pela Figura 21 (dB/Km).

Figura 21 - Atenuação devido à atmosfera, por Km, para a frequência de 1 a 350 GHz no nível do mar para ar seco e vapor d'água com densidade de 7.5 g/m³.



Fonte: extraído de (10).

2.9 DEGRADAÇÃO DO XPD (CROSS-POLARIZATION DISCRIMINATION)

A qualidade da transmissão em rádios co-canais é significativamente impactada pela degradação da polarização cruzada (XPD) ao longo das rotas de transmissão. Quando uma onda

contida no plano de um alimentador de antena (horizontal ou vertical) incide nesse alimentador com um ângulo de incidência de zero, ocorrem as seguintes consequências (10):

- O alimentador recebe a onda com a máxima potência ou mínima perda.
- O outro alimentador, que está "cruzado" em relação ao primeiro, captura apenas uma mínima potência da onda proveniente do primeiro alimentador.

A diferença de potência recebida entre o alimentador principal e o cruzado, medida em decibéis (dB), é chamada de discriminação de polarização cruzada, ou XPD. Teoricamente, seu valor deveria ser infinito, porém, na prática, possui valores finitos, geralmente da ordem de dezenas de dB. Vale ressaltar que, se a polarização principal é deteriorada devido à alteração do ângulo de incidência, a XPD também diminui, ou seja, é igualmente prejudicada (10).

Os métodos matemáticos para cálculo do impacto da degradação do XPD no enlace são encontrados na ITU-R P.530.

2.10 ATENUAÇÃO TOTAL LÍQUIDA

Após o estudo das atenuações devido a diversos fatores, como os apresentados anteriormente, e considerando os ganhos dos equipamentos para remediar esses efeitos, a atenuação total líquida é calculada pela Equação 2.13:

$$A_T = L_{bf} + A_{ab} + A_{rmf} + A_{CA} + A_{CB} + A_{atTx} + A_{atRx} + A_{ob} - (G_T + G_R) \quad [dB] \quad (2.13)$$

Em que:

- L_{bf} – Atenuação no espaço livre;
- A_{ab} – Atenuação devido à absorção atmosférica;
- A_{rmf} – Atenuação total no circuito de ramificação nos lados Tx e Rx;
- A_{CX} – Atenuação no guia de onda ou cabo coaxial das estações A e B;
- A_{atXx} – Valor do atenuador nos lados Tx e Rx;
- A_{ob} – Atenuação devido a obstruções;
- G_X – Ganho nas antenas de transmissão e recepção.

Obs.: atenuadores do lado Tx são utilizados para reduzir as interferências causadas em outros enlaces. Atenuadores do lado Rx são utilizados em enlaces muito curtos para evitar a saturação do receptor.

2.11 CRITÉRIOS DE VISIBILIDADE

Para estabelecer os critérios de visibilidade em um enlace, é essencial obter informações sobre o perfil do terreno. Com base nessas informações, o projetista aplica a correção equivalente da curvatura da Terra (fator K) ao perfil do enlace. A recomendação ITU-R P.530 é amplamente utilizada e fornece o valor mínimo de K para garantir a qualidade do enlace em 99,9% do tempo durante o pior mês do ano, levando em conta a distância envolvida.

Após a correção do perfil, o projetista deve determinar a altura da antena com base na porcentagem do raio de Fresnel que deve ser desobstruído. Essa porcentagem pode variar dependendo da frequência de operação utilizada. Esses critérios são essenciais para garantir uma visibilidade adequada e minimizar os efeitos adversos de obstáculos no enlace de comunicação (10).

A seguir, é apresentado um passo a passo, baseado no padrão que será utilizado para o dimensionamento da altura das torres e das antenas:

- I. Aplicar o perfil de correção equivalente a curvatura da Terra para o valor de $K_{\text{médio}}$ para 50% do tempo (na indisponibilidade deste valor para o local considerado, utiliza-se $K = 4/3$).
- II. Aplicar ao perfil a correção do valor de $K_{\text{mínimo}}$ (99,9%) da Figura 18, utilizando o comprimento do enlace em questão.
- III. Determinar a altura da antena para os valores de $K_{\text{médio}}$ e $K_{\text{mínimo}}$ obtidos nos passos anteriores e a porcentagem do raio de Fresnel, conforme a Tabela 4 abaixo, em função da faixa de frequência de operação.

Tabela 4 – Fator de piora por configuração de RF.

< 1 GHz	Entre 1 e 3 GHz	Acima de 3 GHz
30% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{médio}}$	60% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{médio}}$	100% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{médio}}$
10% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{mínimo}}$	30% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{mínimo}}$	60% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{mínimo}}$

Fonte: Extraído de (10).

Para estimar a altura das antenas do enlace deve-se adotar um valor de referência para a antena no primeiro ponto, o qual arbitrou-se a sigla “ h_1 ”, e assim obter o valor de altura da antena no outro ponto a partir das Equações 2.14:

$$h_2 = \frac{d \cdot (h_{pc} + HC + MC + MS) - d_2 \cdot (hA + h_1 - hB)}{d_1}; \text{ para } K = 4/3 \quad (2.14-A)$$

$$h_2' = \frac{d \cdot (h_{pc} + HC' + MC + MS) - d_2 \cdot (hA + h_1 - hB)}{d_1}; \text{ para } K = \text{mínimo} \quad (2.14-B)$$

Em que:

- d – Distância total do enlace;
- d_1 – Distância do obstáculo à estação A;
- d_2 – Distância do obstáculo à estação B;
- hA – Altitude da estação A;
- hB – Altitude da estação B;
- h_1 – Altura da antena A, tomada como referência;
- H_{pc} – Altitude do obstáculo / ponto crítico;
- RF – 100% do Raio de Fresnel no ponto crítico calculado por:

$$RF = \left[\frac{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{D} \right]^{1/2}$$

- RF' – 60% do Raio de Fresnel no ponto crítico;
- Hm – Correção da curvatura da Terra para $K = 4/3$ calculado por:

$$Hm = \frac{d_1 \cdot d_2}{(K * 12740000)}$$

- Hm' – Correção da curvatura da Terra para $K = K_{\text{minimo}}$;
- HC – É obtido pela soma de RF com Hm ;
- HC' – É obtido pela soma de RF' com Hm' ;
- MC – Margem de crescimento de árvores no ponto crítico;
- MS – Margem de segurança devido à precisão das medidas.

IV. Utilizar o maior valor obtido entre os passos I e III para as antenas das duas pontas do enlace.

2.12 CÁLCULO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE

Todo cálculo de desempenho visa ao atendimento do parâmetro mais crítico, relativo ao SESR (*Second Severely Error Seconds Ratio* - parâmetro que quantifica o tempo durante o qual a recepção de um sinal ou comunicação sofre degradação severa). Se, após os cálculos iniciais considerando a configuração inicial, o percentual de interrupção e indisponibilidade não atender às especificações definidas, uma nova análise deve ser realizada. Essa análise envolve a variação de parâmetros como potência de transmissão, ganho das antenas e a possível implementação de contramedidas adicionais, entre outros (10).

2.12.1 Nível de Recepção Nominal

O nível de recepção é calculado a partir da atenuação total líquida, de acordo com a Equação 2.15:

$$P_{RN} = P_T - A_T \text{ [dBm]} \quad (2.15)$$

Em que:

- P_T – Potência de transmissão na saída do rádio em dBm;

- A_T – Atenuação total em dB;

2.12.2 Margem Líquida do Enlace

A análise da margem líquida do enlace é realizada tomando conhecimento da sensibilidade do receptor (Rx). Utilizando os dados fornecidos pelo fabricante obtém-se o valor para uma determinada BER (*Bit Error Rate* - representa a proporção de bits recebidos incorretamente em relação ao número total de bits transmitidos) o valor de limiar de recepção (S_{RX}). A margem líquida é, então, obtida pela Equação 2.16:

$$M = P_{RN} - S_{RX} \text{ [dB]} \quad (2.16)$$

Em que:

- P_{RN} – Potência de recepção nominal em dBm;
- S_{RX} – Limiar de recepção em dBm.

2.12.3 Probabilidade de Desvanecimento Plano e Seletivo

Nesses cálculos são utilizados os parâmetros climáticos e topográficos levantados pelo ITU-R ou por outras entidades como o CETUC (Centro de Estudos em Telecomunicações). Como esses parâmetros são levantados considerando o pior mês, podendo utilizá-los diretamente no cálculo de desempenho. Nos cálculos de disponibilidade, entretanto, como as especificações são para média anual, haverá a necessidade de conversão do valor do pior mês para média anual (10).

2.12.3.1 Probabilidade de Desvanecimento Plano

Segundo a Rec. P.530 do ITU-R, a probabilidade de desvanecimento plano P_0 (em percentual) é dada pela Equação 2.17:

$$P_0 = K \cdot d^{3,6} \cdot f^{0,89} \cdot (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,4} \quad [\%] \quad (2.17)$$

Em que:

- d – Comprimento do enlace em Km;
- f – Frequência central em GHz;
- ε_p – Inclinação do enlace em mrad calculada por: $\varepsilon_p = \frac{(h_1 - h_2)}{d}$;
- h_1 e h_2 – Altitude das antenas em metros com relação ao nível do mar;
- K – Fator climático calculado por: $K = 5,0 \times 10^{-7} \cdot 10^{-0,1 \cdot (C_0 - C_{Lat} - C_{Lon})} \cdot pL^{1,5}$;
- C_0 – Fator que depende da altitude das antenas e tipo de terreno conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Valor do C_0 por Tipo e Altitude do Terreno.

Altitude da antena mais baixa e o tipo de terreno	C_0 (dB)
Antena mais baixa entre (0-400 m) – Terreno Plano	0
Antena mais baixa entre (0-400 m) – Terreno Rugoso	3,5
Antena mais baixa entre (400-700 m) – Terreno Plano	2,5
Antena mais baixa entre (400-700 m) – Terreno Rugoso	6
Antena mais baixa acima de 700 m – Terreno Plano	5,5
Antena mais baixa acima de 700 m – Terreno Rugoso	8
Antena mais baixa acima de 700 m – Terreno Montanhoso	10,5

Fonte: ITU-R P.530-9.

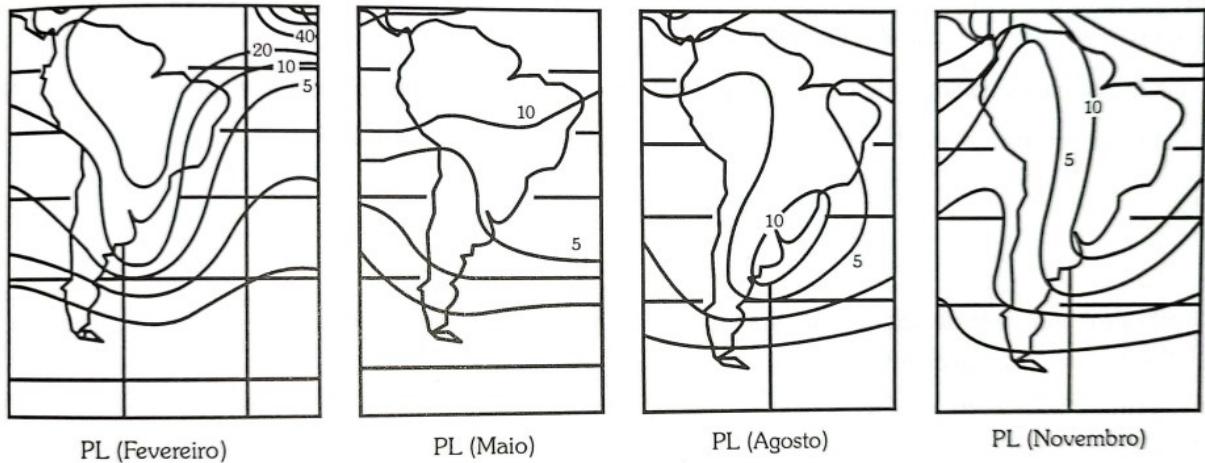
O coeficiente C_{Lat} depende da latitude ξ , conforme apresentado em seguida:

- $C_{Lat} = 0$ dB para $\xi \leq 53^\circ$ N ou S
- $C_{Lat} = -53 + \xi$ dB para 53° N ou S $< \xi < 60^\circ$ N ou S

- $C_{Lat} = 7$ dB para $\xi \geq 60^\circ$ N ou S
- E o coeficiente de longitude C_{Lon} :
- $C_{Lon} = 3$ dB para longitudes da Europa e África
 - $C_{Lon} = -3$ dB para longitudes da América do Sul e do Norte
 - $C_{Lon} = 0$ dB para os demais casos

O valor do fator “pL”, percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano, pode ser obtido na recomendação ITU-R P.453. No caso do Brasil está entre 15 e 25%.

Figura 22 - Valores do pL no Brasil.



Fonte: extraído de (10).

2.12.3.2 Probabilidade de Indisponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano

Para que ocorra a interrupção do enlace, é necessário que o desvanecimento tenha profundidade suficiente para que o nível de recepção caia abaixo do limiar para SES (Segundos Severamente Errados) (10).

O cálculo da probabilidade da indisponibilidade do canal de RF é feito pela Equação 2.18 (10):

$$p_w = p_0 \times 10^{-M/10} \quad [\%] \quad (2.18)$$

Em que:

- p_0 – Probabilidade de desvanecimento plano;
- M – Margem líquida do enlace em dB;

2.12.3.3 Probabilidade Desvanecimento Seletivo

De acordo com a Recomendação ITU-R P530, a probabilidade de desvanecimento seletivo “ η ” é calculada a partir da probabilidade de desvanecimento plano “ p_0 ” pela Equação 2.19 (10):

$$\eta = 1 - e^{-0,2(p_0)^{0,75}} \quad [\%] \quad (2.19)$$

2.12.3.4 Probabilidade de Interrupção Devido ao Desvanecimento Seletivo

A probabilidade de interrupção neste caso depende do atraso médio do sinal refletido e da curva de assinatura. Quanto maior o atraso do sinal refletido mais prejudicial será o efeito. O atraso médio é calculado pela Equação 2.20 (10):

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad [ns] \quad (2.20)$$

Em que:

- d – Distância do enlace em km;

De acordo com a Recomendação P 530, a probabilidade de ocorrência do SES é obtida pela Equação 2.21 (10):

$$P_s = 2,15\eta \left(W_M \times 10^{-\frac{B_M}{20}} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-\frac{B_{NM}}{20}} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad [\%] \quad (2.21)$$

Em que:

- W_x – Largura da curva de assinatura em GHz;
- B_x – Profundidade da assinatura em dB;
- $\tau_{r,x}$ – Retardo de referência (ns) utilizado na obtenção da curva de assinatura, com x denotando desvanecimento de fase mínima (M) ou de fase não mínima (NM).

2.12.4 Probabilidade total de ocorrência de SES

A probabilidade total de ocorrência de SES é calculada aplicando-se a Equação 2.22, de posse dos valores das probabilidades para os desvanecimentos plano e seletivo:

$$P_t = P_0 + P_s \quad [\%] \quad (2.22)$$

Em que:

- P_0 – Probabilidade de desvanecimento plano;
- P_s – Probabilidade de desvanecimento seletivo.

O tempo de interrupção no pior mês pode ser calculado conforme a Equação 2.23:

$$T_i = \frac{P_t \cdot 30 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{100} \quad [s] \quad (2.23)$$

Em que:

- P_t – Probabilidade total de ocorrência do SES.

2.12.5 Indisponibilidade do enlace devido à chuva

A porcentagem de indisponibilidade ocasionado por chuvas é calculado pela Equação 2.24:

$$I_{chuva} = 10^{-6,64 + \sqrt{40,29 - 23,25 \cdot \log\left(\frac{8,33 \cdot M}{AT_{0,01}}\right)}} \quad [\%] \quad (2.24)$$

Em que:

- M – Margem líquida do enlace;
- $AT_{0,01}$ – Atenuação causada pela chuva para 0,01% do tempo.

2.12.6 Cálculo da Porcentagem para o Pior Mês (ITU-R 841)

Deve-se usar o valor de P_r encontrado e multiplicar por um fator denominado “Q”, conforme Equação 2.25 (10):

$$P_w = Q \cdot I_{chuva} \quad [\%] \quad (2.25)$$

Em que:

- P_w – Indisponibilidade do pior mês;
- Q – Coeficiente fornecido pelos fatores de Q_1 e B .

Pela ITU-R P-841 podemos observar que os valores globais de Q_1 e B podem ser (10):

- $Q_1 = 2,85$;
- $B = 0,13$;

Assim temos a relação:

- $I_{chuva} = 0,30 \cdot P_w^{1,15} \quad [\%]$, para: $0,00019 < P_w (\%) < 7.8$

2.12.7 Indisponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano e Seletivo

A indisponibilidade devido ao desvanecimento plano e seletivo é calculada conforme a Equação 2.26, considerando a probabilidade total de ocorrência do SES, já calculada, e o fator de correção do pior mês para a média anual, adotado como 0,3 na referência (10).

$$I_{desv} = P_t \cdot 0,3 \quad [\%] \quad (2.26)$$

2.12.8 Indisponibilidade do Equipamento

O cálculo da indisponibilidade de um sistema é uma avaliação anual que considera três causas principais: a indisponibilidade causada por chuvas, a indisponibilidade resultante de falhas de equipamentos e a indisponibilidade devido a desvanecimentos prolongados (plano e seletivo). Cada componente é calculado de maneira independente e, quando somados, produzem a indisponibilidade total do sistema (10).

A indisponibilidade de equipamentos é definida como a porcentagem de tempo durante a qual um equipamento específico não está operacional. Esse cálculo leva em consideração o tempo médio entre falhas do sistema, o tempo médio entre os reparos e diversos fatores, incluindo a eficiência da equipe de manutenção, a distância média entre o centro de manutenção e as estações e a eficácia geral do gerenciamento. Essa indisponibilidade é calculada usando a Equação 2.27:

$$I_{EQ} = \frac{2 \cdot M_{TTR}}{M_{TBF}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.27)$$

2.12.9 Indisponibilidade Total

A indisponibilidade total é calculada conforme a Equação 2.28, considerando, no caso em estudo, a indisponibilidade devido aos desvanecimentos e a indisponibilidade pela chuva:

$$I_T = I_{chuva} + I_{desv} \quad [\%] \quad (2.28)$$

O tempo de indisponibilidade no ano pode ser obtido de acordo com a Equação 2.29:

$$T_{ind} = \frac{I_T \cdot 365 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24}{100} \quad [s] \quad (2.29)$$

2.13 FATORES DE MELHORIA DE DIVERSIDADE DE FREQUÊNCIA E ESPAÇO

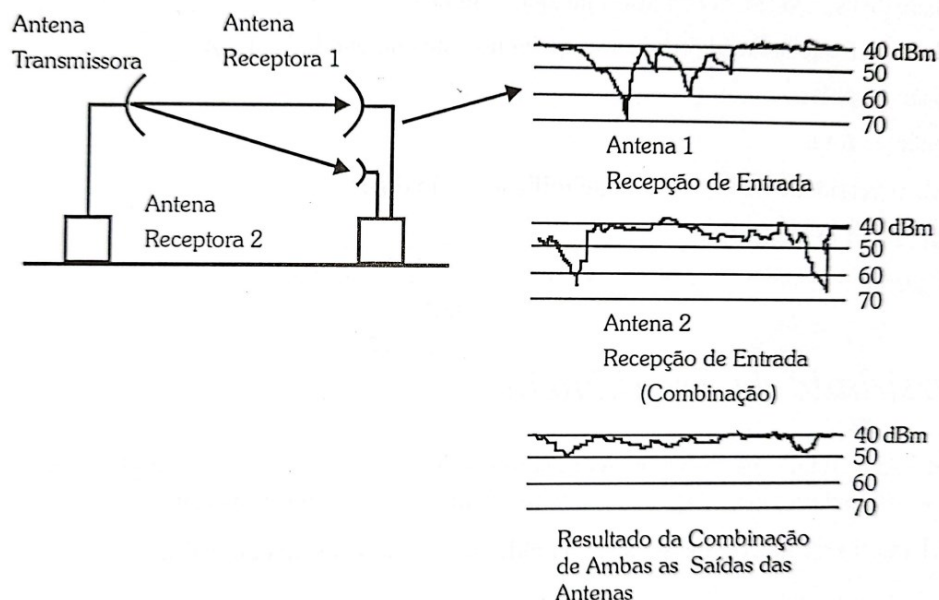
As técnicas de diversidade têm como objetivo mitigar os efeitos dos desvanecimentos, especialmente em regiões com desvanecimento profundo. Essas técnicas envolvem o uso de múltiplos receptores para melhorar a confiabilidade do sistema. Existem diversas formas de implementar a diversidade de recepção, incluindo (10):

- **Diversidade de espaço:** como mostra a Figura 23, essa técnica consiste em posicionar duas antenas de recepção em um mesmo plano vertical. A antena principal é colocada no ponto mais alto, enquanto a antena auxiliar fica alguns metros abaixo. Quanto maior for a diferença de posição entre as antenas, menor será a probabilidade de que ambas sofram o mesmo tipo de desvanecimento ao mesmo tempo. Em casos extremos, é possível utilizar três antenas para obter um nível ainda maior de diversidade espacial. Isso ajuda a reduzir a correlação entre os sinais recebidos, melhorando a qualidade do sinal;
- **Diversidade de frequência:** envolve o uso de diferentes frequências dentro da mesma banda básica. Isso permite que o sistema aproveite as características de propagação

distintas em cada frequência, reduzindo a probabilidade de que ambas as frequências sofram desvanecimentos simultaneamente. O desvanecimento dificilmente atinge dois canais de rádio ao mesmo tempo com a mesma profundidade porque o desvanecimento é seletivo em frequência. Para que mais de uma frequência seja atingida pelo "notch" (região específica do espectro de frequência onde ocorre uma atenuação acentuada do sinal) ao mesmo tempo, são necessárias reflexões que causem atrasos de percurso significativos. A frequência reserva utilizada nesse caso também é conhecida como canal de proteção;

- **Diversidade de polarização:** utiliza antenas com polarizações diferentes para explorar a diversidade do canal. Isso é especialmente útil em áreas onde a polarização do sinal é afetada por obstáculos ou condições atmosféricas;
- **Diversidade de rota:** envolve o uso de múltiplos caminhos de propagação para o sinal, como a utilização de antenas direcionais em diferentes direções. Isso ajuda a superar os efeitos dos desvanecimentos seletivos em uma determinada rota, melhorando a confiabilidade da transmissão.

Figura 23 - Exemplo de Diversidade de Espaço.



Fonte: extraído de (10).

2.13.1 Fator de Melhoria da Contramedida

É uma medida utilizada para avaliar a eficácia de uma contramedida em relação a um parâmetro de referência. É obtido pela Equação 2.30 (10):

$$I = P/P_c \quad (2.30)$$

Em que:

- I – Fator de melhoria da contramedida;
- P – Probabilidade de ocorrência do fenômeno sem a utilização da contramedida;
- P_c – Probabilidade de ocorrência do fenômeno com a utilização da contramedida.

Um valor maior de “I” indica uma maior melhoria alcançada pela contramedida, enquanto um valor menor indica uma menor eficácia da contramedida em relação ao desempenho de referência. Essa medida auxilia na tomada de decisões sobre a implementação de contramedidas em sistemas de comunicação, permitindo avaliar se os ganhos obtidos justificam os recursos investidos na sua aplicação.

2.13.2 Fator de Melhoria da Diversidade de Frequência

2.13.2.1 Desvanecimento Plano

De acordo com a Rec. ITU-R P.530, o fator de melhoria da diversidade de frequência na configuração (1+1) para desvanecimento plano é calculado pela Equação 2.31 (10):

$$I_{ff} = \frac{80}{f \cdot d} \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right) \cdot 10^{F/10} \quad (2.31)$$

Em que:

- Δf – Separação entre os canais em GHz. Caso $\Delta f > 0,5$ GHz, utiliza $\Delta f = 0,5$;
- f – Frequência central do plano em GHz;
- F – Margem líquida do enlace em dB;
- d – Distância total do enlace em km.

2.13.2.2 Desvanecimento Seletivo

Para estimar esta melhoria é necessário primeiramente realizar o cálculo do fator de correlação K_f através da Equação 2.32:

$$K_f = \exp(-0,9 \cdot \Delta f \cdot \tau_m) \quad (2.32)$$

Em que:

- τ_m – Retardo médio em (ns) conforme equação 2.20;

O fator de melhoria para esta condição é dado pela Equação 2.33:

$$I_{fs} = \left(\left(\frac{\eta}{100} \right) \cdot (1 - K_f) \right) / P_s \quad (2.33)$$

Em que:

- P_s – Probabilidade de ocorrência do SES conforme equação 2.21;
- η – probabilidade de ocorrência de desvanecimento seletivo em %.

2.13.3 Fator de Piora para a Configuração (n+1)

Para esta configuração a eficiência da diversidade de frequência é reduzida devido à ocorrência de desvanecimentos simultâneos em dois ou mais canais. O fator de piora é calculado pela Equação 2.34:

$$F_p = \left(\frac{1}{\frac{1}{p-r} + \frac{1}{2} \sum \left(\frac{1}{p-i} \right)} \right) \cdot n^{0,5} \quad (2.34)$$

Em que:

- p – Posição do pior canal de proteção;
- r – Posição do canal reserva;
- n – Número de lances na seção de comutação.

Tabela 6 – Fator de piora por configuração de RF.

Configuração	(1+1)	(2+1)	(3+1)	(4+1)	(5+1)	(6+1)	(13+1)
Fator de Piora	1,0	1,5	1,75	1,92	2,04	2,14	2,55

Fonte: extraído de (10).

O fator de melhoria na configuração $n + 1$ é calculado por meio das Equações 2.35:

$$I_{ff}(n + 1) = \frac{I_{ff}(1 + 1)}{F_p} \quad (2.35-A)$$

$$I_{fs}(n + 1) = \frac{I_{fs}(1 + 1)}{F_p} \quad (2.35-B)$$

Nos casos em que o resultado do cálculo é menor que 1, considera-se o valor unitário por não fazer sentido uma melhoria inferior a 1. Nos casos em que supera o valor de 20, adota-se 20.

O fator de melhoria da diversidade de frequência é maior para o desvanecimento seletivo do que para o plano.

2.13.4 Fator de Melhoria da Diversidade de Espaço

Essas melhorias são muito maiores do que as obtidas pela diversidade de frequência, devido a menor correlação entre os sinais recebidos, principalmente quando o espaçamento vertical entre as antenas é superior a 10 metros.

2.13.4.1 Desvanecimento Plano

O fator de melhoria da diversidade de espaço para desvanecimento plano é calculado pela Equação 2.36:

$$I_{sf} = 1,2 \times 10^{-2} \cdot \left(\frac{f}{d}\right) \cdot s^2 \cdot v^2 \cdot 10^{A/10} \quad (2.36)$$

Em que:

- f – Frequência central em GHz;
- d – Comprimento do enlace em km;
- s – Espaçamento vertical entre as antenas em m
- v – relação entre o ganho das antenas principais e de diversidade de espaço, calculado por: $v = 10^{\frac{G_{princ} - G_{div}}{20}}$
- G_{princ} – É o ganho da antena principal em dBi;
- G_{div} – É o ganho da antena de diversidade em dBi.

Na prática, o valor de espaçamento é limitado em 15 metros por medida de segurança do projeto. Em certos casos, por razões financeiras visando economia, ou devido à alta carga

da torre, utilizam-se antenas de diâmetros menores para diversidade de espaço, o que traz uma melhoria menor do que se utiliza-se uma antena de mesmo diâmetro.

2.13.4.2 Desvanecimento Seletivo

O fator de melhoria da diversidade de espaço para desvanecimento seletivo é calculado pela Equação 2.37:

$$I_{ss} = \left(\left(\frac{\eta}{100} \right) * (1 - K_s) \right) / P_s \quad (2.37)$$

Em que:

- η – Probabilidade de ocorrência de desvanecimento seletivo em %;
- K_s – Fator de correlação calculado por: $K_s = \exp \left(-4 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{s}{\lambda} \right)^2 \right)$;
- λ – Comprimento de onda.

O valor da melhoria de diversidade de frequência é limitado entre 1 e 100. Além disso vale ressaltar que a melhoria da diversidade de espaço para desvanecimento seletivo é muito maior do que para o desvanecimento plano.

2.13.5 Fator de Melhoria Composta de Diversidade de Frequência e Espaço

Em muitos casos as diversidades de frequência e espaço são utilizadas em conjunto no mesmo enlace.

Nestes casos, a melhoria conjunta das duas contramedidas, devido ao efeito sinérgico, é igual ao produto entre as melhorias individuais para os desvanecimentos plano e seletivo (10).

A melhoria conjunta das diversidades é calculada pela Equação 2.38 a seguir:

$$I_{total} = I_f \cdot I_s \quad (2.38)$$

Em que:

- I_f – Melhoria devido a diversidade de frequência;
- I_s – Melhoria devido a diversidade de espaço.

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é feito o projeto do enlace de micro-ondas visando suprir as necessidades da empresa discutidas no Capítulo 1. Esse projeto é executado a partir da teoria vista no Capítulo 2 utilizando o modelo sistêmico otimizado, ou seja, evitando o superdimensionamento. Os parâmetros escolhidos para a simulação é uma aproximação dos parâmetros reais utilizados atualmente e no Capítulo 4, de metodologia e materiais, é apresentado um novo resultado da simulação utilizando exatamente a configuração do sistema atual, para facilitar na comparação e na compreensão de possíveis melhorias.

3.1 TIPOS DE ENLACE EM TERMOS DE SUA LOCALIZAÇÃO NA REDE DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de rádio podem ser classificados com base em sua localização na rede de transmissão como: *backbone*, entroncamentos secundários e de acesso. Cada tipo desempenha um papel específico na infraestrutura de comunicações e tem características e aplicações distintas (10).

Os enlaces de *backbone* estão localizados no núcleo da rede, conectando grandes áreas geográficas e servindo como espinha dorsal da infraestrutura de comunicação.

Os rádios utilizados nesse tipo de enlace são caracterizados por fornecerem alta capacidade de transmissão, sendo projetados para lidar com grandes volumes de tráfego de dados, por alcançarem longas distâncias e possuírem conexões de alta velocidade, muitas vezes na faixa dos Gigabits, além se serem altamente confiáveis.

Os enlaces de entroncamento secundário estão posicionados em locais intermediários da rede, conectando sub-redes ou áreas locais a uma rede de *backbone* maior.

Geralmente os rádios aplicados neste enlace possuem capacidade de transmissão menor em comparação aos utilizados no *backbone* e cobrem distâncias moderadas, sendo adequados para conexões entre áreas urbanas e sub-redes.

Os enlaces de acesso estão localizados próximos aos pontos de uso final, como residências, empresas e dispositivos de usuário final. O enlace é caracterizado por utilizar rádios de menores capacidades em comparação aos anteriores e para cobrir distâncias mais curtas.

3.2 DEMANDA E SOLUÇÃO APLICADA ATUALMENTE

Essa monografia visa o estudo e a otimização da infraestrutura de rede atualmente utilizada pelo grupo empresarial em questão, para isso deve-se avaliar a demanda e os objetivos a serem atingidos.

As principais exigências da empresa são garantir a agilidade e a segurança na troca de dados entre suas filiais. Para o enlace do *backbone*, o requisito é que ele forneça a capacidade mais próxima possível da contratada pela ISP, sendo de 300 Mbps (Mega bits por segundo) atualmente. Já para as redes de acesso, os usuários poderão utilizar até 100 Mbps de velocidade de tráfego nas edificações dentro do perímetro urbano e nas áreas rurais. Assim, a arquitetura da rede do *backbone* deverá ser Gigabit e a rede de acesso do tipo Fast (limitado a 100 Mbps). Além disso a infraestrutura deverá suportar com qualidade e rapidez o serviço de comunicação de telefonia IP, o qual é distribuído por um servidor PABX da empresa.

Dois pontos cruciais devem ser atendidos, são eles: a confiabilidade do sistema de monitoramento, o qual é composto de câmeras IP, dispositivos NVR's e computadores, e o acesso ao servidor de banco de dados e gestão agropecuária com baixa latência na troca de pacotes e conexão segura, o qual deve permanecer acessível independente da disponibilidade do serviço de internet fornecido pela ISP.

Para melhor compreensão da estrutura de rede WAN da empresa, foi criado pelo autor um diagrama, o qual pode ser consultado no Apêndice E, evidenciando sua abrangência e complexidade, composta de vários entroncamentos secundários atrelados ao *backbone* além de vários roteadores, *switches*, câmeras, telefones, estações de trabalho e outros componentes.

O diagrama apresenta que a rede tem início no prédio comercial “Uberlândia Business Tower (UBT)”, onde a internet é fornecida pela provedora Algar Telecom, sendo dois planos de fibra óptica de 300 Mbps contratados, um dedicado a atender a demanda da empresa “Agroporto Agricultura e Pecuária Ltda.” e outro a atender a demanda da filial “Fomus

Consultoria Ltda.”. A ponte entre o serviço de telefonia privado da empresa e a telefonia pública é feito pela provedora EMBRATEL (a qual foi incorporada à empresa Claro) pelo plano E1 empresarial, com taxa de transferência de 2 Mbps e 32 *timeslots* de 64 kbps cada, permitindo até 30 chamadas telefônicas simultâneas.

O diagrama apresenta três antenas de *backbones* localizadas no prédio UBT, sendo a superior o ponto de partida do radioenlace da empresa Agroporto, a do meio que liga a fazenda Boa Vista (de um dos acionistas), e a inferior que conecta a residência deste mesmo acionista à rede, todas chegando ao destino em dois saltos.

O UBT oferece facilidades significativas para a implantação destes enlaces. Sua localização estratégica e altura elevada proporcionam uma visada privilegiada em relação a diferentes pontos da região, permitindo uma transmissão de sinal eficiente e de longo alcance, e trazendo uma economia no investimento que deveria ser aplicado na implantação da torre de comunicação. Além disso, suas instalações avançadas e infraestrutura robusta são ideais para acomodar os equipamentos necessários para o enlace de micro-ondas, garantindo a estabilidade e confiabilidade das comunicações.

Devido à grandiosidade da rede o foco do estudo é a solução utilizada pela empresa Agroporto, localizada na zona rural do município Tupaciguara (MG), para trocar dados com a empresa filiada Fomus, localizada no município de Uberlândia (MG), sendo um escritório interno ao prédio comercial UBT.

Nesse sentido, um estudo minucioso do projeto de radioenlace e camada de rede é feito do *backbone* apenas, que interliga as duas filiais Agroporto e Fomus, uma vez que os métodos aplicados aqui são os mesmos para o estudo dos outros enlaces, evitando que esta monografia se torne excessivamente extensa.

3.3 TOPOLOGIA DOS SISTEMAS DE RÁDIO

A solução adotada pela empresa atualmente utiliza duas topologias de transmissão por rádio: Ponto a Ponto (P2P) e Ponto a Multiponto (P2MP). A topologia P2P é empregada no *backbone*, enquanto a topologia P2MP é mais utilizada nos enlaces secundários (*branch links*).

3.3.1 Ponto a Ponto (P2P)

A principal característica da topologia P2P é a alta confiabilidade e velocidade na transmissão de dados, voz e vídeo. Como não há compartilhamento de banda com outros dispositivos, o ponto a ponto oferece uma conexão dedicada e aproveita-se do máximo que o equipamento de rádio tem a fornecer, resultando em maior qualidade na troca de informações mesmo em distâncias acima dos 50 km.

No diagrama da Apêndice E, os enlaces que estão operando neste modo são:

- FOMUS – MUNARI;
- MUNARI – AGROPORTO;
- UBT – SUPORTE LOGÍSTICA;
- SUPORTE LOGÍSTICA – FAZENDA BOA VISTA;
- UBT – SUN MANAGEMENT;
- SUN MANAGEMENT – R2.

3.3.2 Ponto a Multiponto (P2MP)

Na topologia P2MP, um ponto central (ponto de acesso) se comunica com múltiplos pontos remotos (estações clientes). O ponto central atua como um *hub* que gerencia o tráfego de dados entre todas as estações clientes conectadas a ele. É uma abordagem eficiente para estabelecer conexões sem fio entre um único ponto central e diversos pontos remotos em uma área geográfica.

Essa topologia é aplicada na fazenda Agroporto para conectar câmeras de vigilância montadas em postes em pontos estratégicos, levar internet até os alojamentos para o bem estar dos funcionários, receber dados dos maquinários agrícolas, trocar informações sobre o gado a partir do uso de um rádio no curral conectado a estação central (a qual foi fixada na torre numa área mais central da empresa, com boa visada e de altura considerável), entre outras aplicações que favorecem a operação da empresa.

Na Fazenda Boa Vista, a aplicação é na segurança, comunicação e lazer, onde vários enlaces estão espalhados comunicando-se com uma estação central, sendo assim, há internet disponível em toda área útil da fazenda.

Vantagens da topologia P2MP:

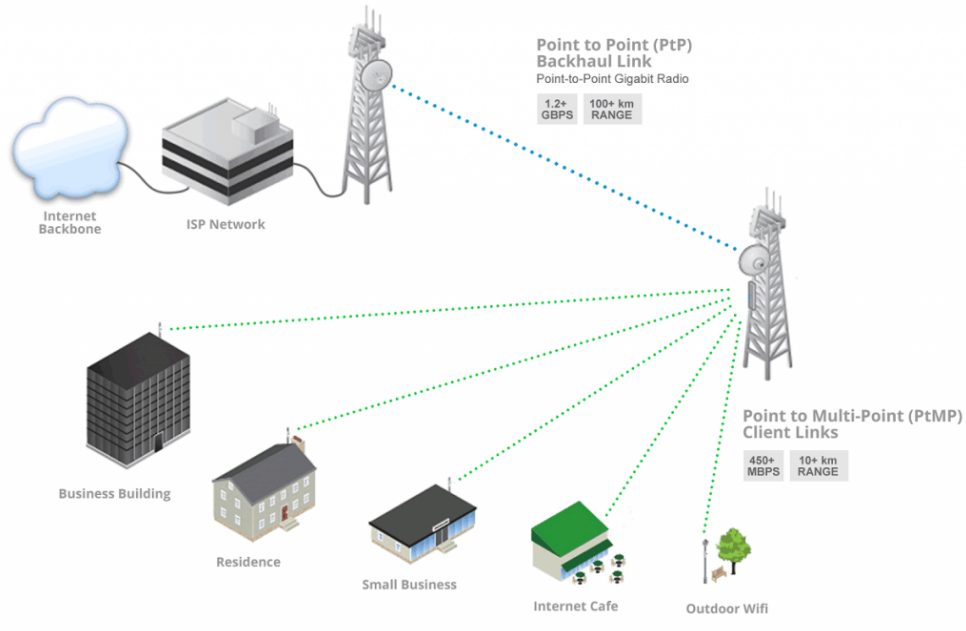
- **Redução de custos:** Uma única estação central pode atender várias estações remotas, o que economiza em custos de infraestrutura e equipamentos;
- **Facilidade de implantação:** É mais simples configurar e instalar uma rede P2MP do que várias redes ponto a ponto independentes;
- **Gerenciamento centralizado:** O ponto central pode controlar e gerenciar todas as estações clientes, facilitando a manutenção e monitoramento da rede;
- **Escalabilidade:** A rede P2MP pode ser facilmente expandida adicionando mais estações remotas sem a necessidade de alterar a configuração do ponto central.

Desvantagens da topologia P2MP:

- **Menor largura de banda para cada estação:** A largura de banda total da rede é compartilhada entre todas as estações clientes, o que pode levar a uma redução da velocidade de transmissão para cada estação individual, especialmente se muitas estações estiverem ativas ao mesmo tempo;
- **Latência potencial:** A latência pode aumentar em comparação com uma rede ponto a ponto, uma vez que todas as comunicações passam pelo ponto central;
- **Menor alcance:** Em geral, a distância máxima entre o ponto central e as estações clientes é menor do que em uma rede ponto a ponto direta.

Um exemplo das duas topologias discutidas nesta seção é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Topologias P2P e P2MP utilizadas em conjunto.



Fonte: extraído de (29).

3.4 DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DOS ENLACES DO *BACKBONE*

3.4.1 *Site Survey*

Uma das etapas mais importantes no projeto de enlaces de micro-ondas é a pesquisa de campo (mais conhecido pelo seu termo inglês: *site survey*).

Antigamente, o *site survey* era feito de forma muito mais manual e demorada. Engenheiros e técnicos precisavam visitar fisicamente os locais de instalação, muitas vezes em áreas remotas e de difícil acesso. Eles realizavam medições manuais das altitudes, identificavam obstáculos, faziam cálculos à mão e, em alguns casos, até mesmo montavam torres temporárias para testar a visada direta.

Hoje, com o avanço das tecnologias, o *site survey* se beneficia de ferramentas e recursos avançados. A seguir, é descrito algumas das principais facilidades que a tecnologia trouxe para os projetos atuais:

- **Uso de Dados Geoespaciais:** Os profissionais podem acessar dados geoespaciais detalhados, como mapas topográficos e imagens de satélite, para planejar e analisar locais de instalação de forma remota;
- **Software de Planejamento:** Ferramentas de software especializado, como o Google Earth Pro e o Pathloss, permitem a análise detalhada do terreno, cálculos de altura das antenas e simulações de enlace sem a necessidade de visitas presenciais;
- **Simulações de Propagação de Sinal:** É possível realizar simulações precisas de como o sinal se propagará no ambiente, levando em consideração obstáculos e condições geográficas. Isso ajuda a determinar a altura ideal das antenas e a frequência apropriada;
- **Ferramentas de Realidade Aumentada:** Algumas ferramentas de realidade aumentada permitem aos técnicos visualizar virtualmente as antenas e o enlace no local antes da instalação;
- **Economia de Tempo e Recursos:** O uso de tecnologias economiza tempo e recursos significativos, eliminando a necessidade de viagens frequentes e permitindo análises mais detalhadas;
- **Precisão Aprimorada:** Com dados mais precisos e simulações avançadas, a precisão das decisões tomadas durante o *site survey* é aprimorada, reduzindo o risco de problemas após a instalação.

É sabido pelo diagrama do Apêndice E que a solução aplicada pela empresa foram dois saltos para atingir o destino, e agora a partir da análise do percurso será validado os motivos dessa decisão.

3.4.2 Análise do Percurso sem Repetição do Sinal

A Tabela 7 apresenta as coordenadas geográficas e altura da maior edificação existente na região das filiais Fomus e Agroporto:

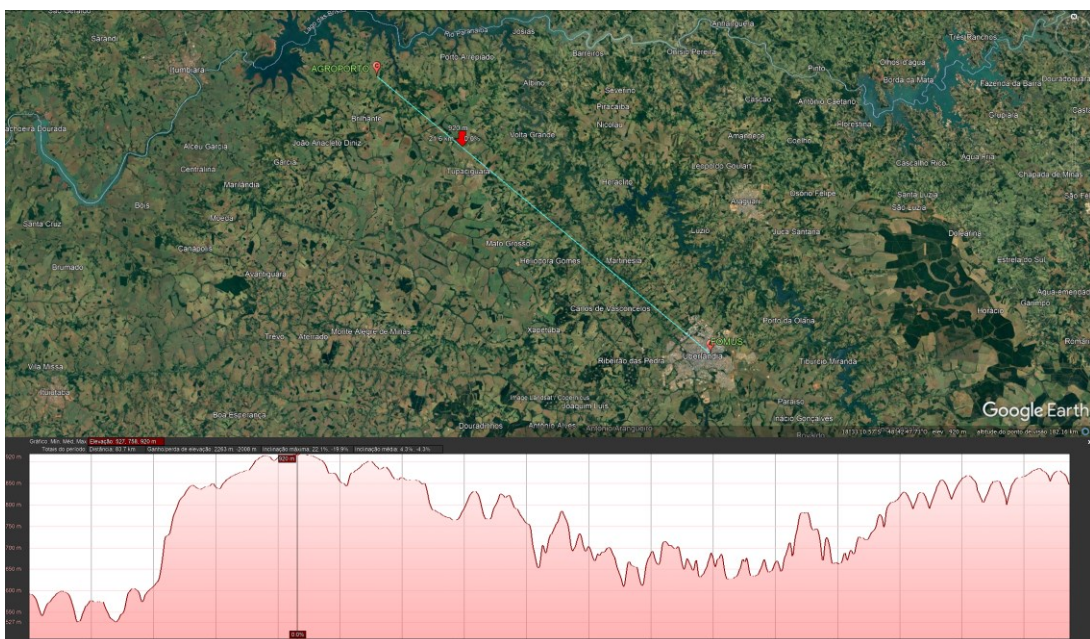
Tabela 7 – Dados geográficos Fomus e Agroporto.

	Fomus	Agroporto
Latitude (S)	18°54'30.70"	18°25'44.70"
Longitude (O)	48°15'41.40"	48°52'11.70"
Altitude em relação ao mar (m)	847	593
Altura da maior edificação (m)	127	30
Cidade (UF)	Uberlândia (MG)	Tupaciguara (MG)
Distância (Km)	83.7	

Fonte: o autor.

Demarcando os pontos no Google Earth com estas coordenadas pode-se traçar uma linha reta entre eles e assim utilizar a ferramenta de perfil de elevação, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Perfil de elevação da visada direta entre Fomus e Agroporto.



Fonte: o autor.

No gráfico de elevação da Figura 25, as medidas de altitude do terreno são referentes ao nível do mar, sem considerar a altitude das edificações, ainda assim fica bem claro que as condições desse percurso não são nada favoráveis à transmissão por visada direta uma vez que a filial Agroporto, Figura 26, se encontra em uma depressão na altitude de 593 m, somados a 30 m do ponto mais alto disponível, enquanto a filial Fomus no prédio UBT, Figura 27, se encontra na elevação de 847 m, somados a 127 m da edificação, o que seria ótimo se não fosse pela obstrução ao longo de vários quilômetros que chega a atingir altitude máxima de 920 m, fazendo-se necessário a instalação de uma torre extremamente alta e cara.

Figura 26 - Local da estação base da Fomus, prédio UBT.



Fonte: Extraído de (40).

Figura 27 - Local da estação base da Agroporto.



Fonte: Fotografia registrada pelo autor *in loco*.

Isso pode ser comprovado aplicando os dados ao código do Apêndice A, desenvolvido para facilitar a obtenção dos resultados, o qual aplica a teoria vista na Seção 2.11. Os valores de entrada e o resultado são apresentados na Figura 28 e discutidos na sequência.

Figura 28 - Dimensionamento da altura das antenas para o cenário da Figura 25.

```
>> Dimensionamento_Altura_das_Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 6.125
Distância total do enlace (km): 83.7
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 62.1
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 21.6
Altitude da estação A (m): 847
Altitude da estação B (m): 593
Altura da antena A, tomada como referência (m): 127
Altitude do ponto crítico (m): 920
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de K mínimo: 0.88
Altura da Antena B para K = 4/3: 452.41 m
Altura da Antena B para K = mínimo: 492.13 m
```

Fonte: o autor.

Já considerando a frequência na qual o *backbone* opera atualmente (6125 MHz) e o ponto mais alto disponível para a antena instalado no UBT, fica claro a inviabilidade do enlace, exigindo uma torre de aproximadamente 500 m de altura, além do fato de que a prática Telebrás recomenda que as torres não tenham altura superior a 130 m, sendo assim é importante a análise para a instalação de repetidoras ao longo do caminho para se obter a conexão desejada, o que é apresentado a seguir.

3.4.3 Análise do Percurso com Repetição do Sinal

A Tabela 8 apresenta as coordenadas geográficas da Fomus e da fazenda Munari, local escolhido para repetir o sinal, enlace pertencente ao *backbone*:

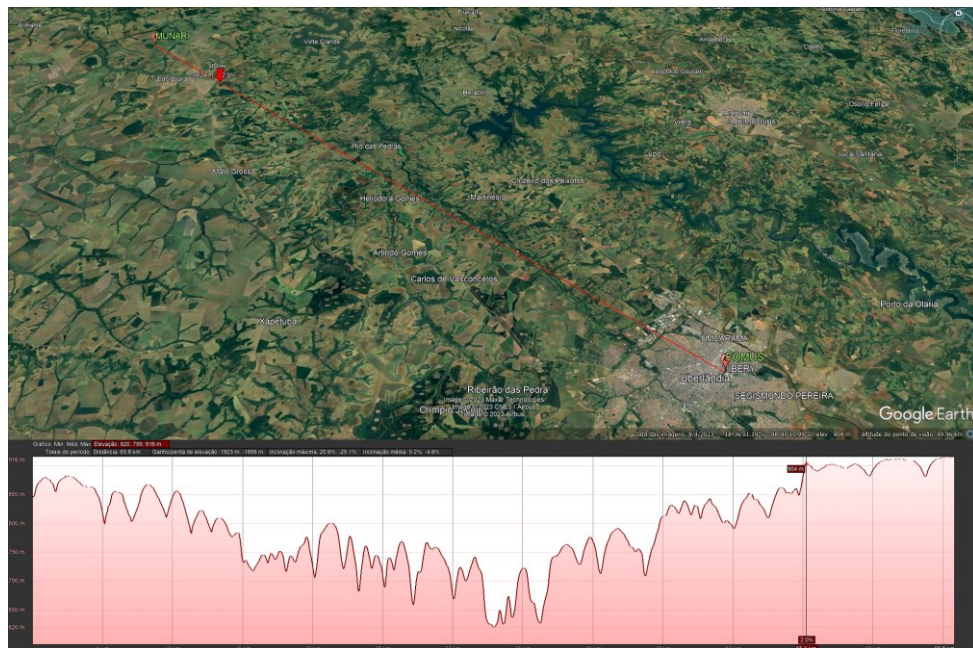
Tabela 8 – Dados geográficos Fomus e Munari.

	Fomus	Munari
Latitude (S)	18°54'30.70"	18°32'27.90"
Longitude (O)	48°15'41.40"	48°44'52.40"
Altitude em relação ao mar (m)	847	915
Altura da maior edificação (m)	127	0
Cidade (UF)	Uberlândia (MG)	Tupaciguara (MG)
Distância (km)	65.8	

Fonte: o autor.

Demarcando os pontos no Google Earth com estas coordenadas, pode-se traçar uma linha reta e assim utilizar a ferramenta de perfil de elevação, como pode ser observado na Figura 29:

Figura 26 - Perfil de elevação da visada direta entre Fomus e Munari.



Fonte: o autor.

É notável o quanto este novo percurso é mais favorável à transmissão ponto a ponto com visada direta, no perfil da Figura 29 ao lado esquerdo é considerado apenas a elevação do terreno de 847 m, somando-o à altura do prédio UBT, onde a antena está fixada no ponto mais elevado, ela chega a atingir 974 m, o que já é mais alto do que o ponto analisado na fazenda Munari sem considerar uma torre, e mais alto que a maior obstrução. Utilizando o mesmo

código anterior para o cálculo, é estimado na Figura 30 quais são as alturas necessárias das antenas baseada na teoria.

Figura 27 - Dimensionamento da altura das antenas para o cenário da figura 29.

```
>> Dimensionamento_Altura_das_Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 6.125
Distância total do enlace (km): 65.8
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 55.2
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.6
Altitude da estação A (m): 847
Altitude da estação B (m): 915
Altura da antena A, tomada como referência (m): 127
Altitude do ponto crítico (m): 905
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de K mínimo: 0.85
Altura da Antena B para K = 4/3: 42.69 m
Altura da Antena B para K = mínimo: 56.08 m
```

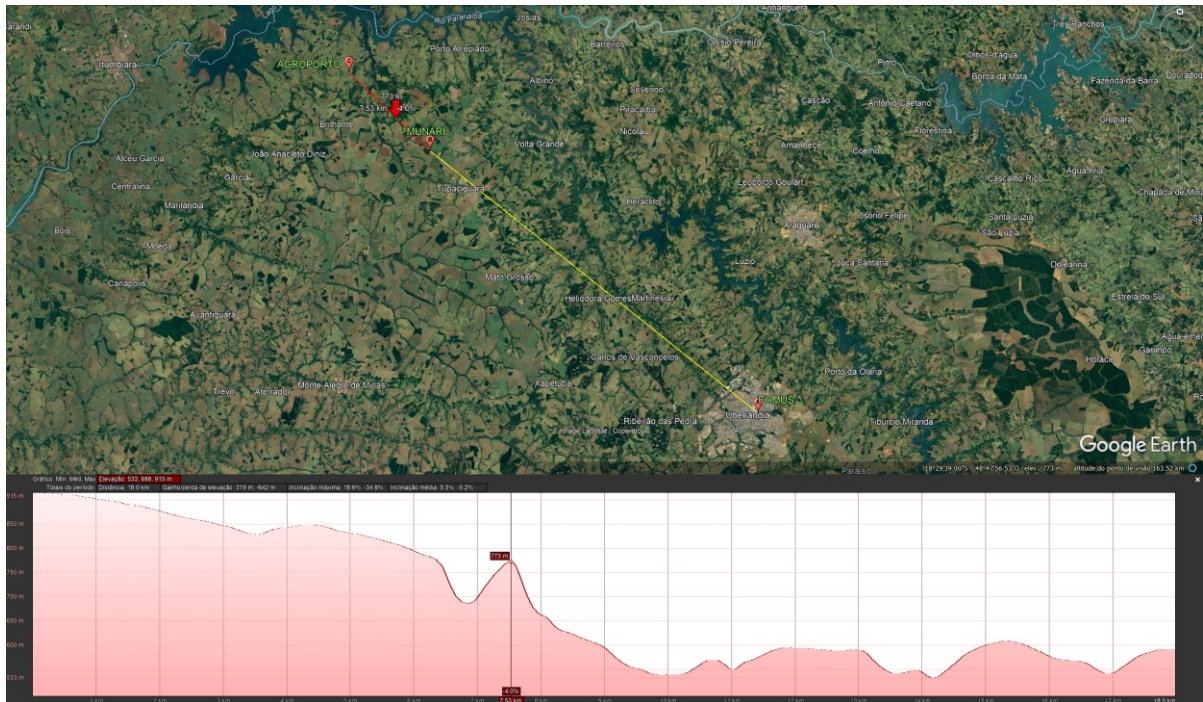
Fonte: o autor.

Os resultados são consideravelmente melhores, sendo necessária uma torre de aproximadamente 60 m para atender os critérios de visibilidade, o que torna o investimento viável.

É válido mencionar que atualmente na fazenda Munari, as antenas estão fixadas em uma torre particular da empresa, do tipo estaiada, com altura de 48 m aproximadamente, a qual pode ser vista na Figura 33.

Por fim, é estimado a altura necessária das antenas para a transmissão em visada direta entre o ponto na Fazenda Munari e a Agroporto, onde a Figura 31 apresenta o perfil de elevação gerado no Google Earth.

Figura 28 - Perfil de elevação da visada direta entre Munari e Agroporto.



Fonte: o autor.

Observando o perfil de elevação traçado já é notável que as condições para transmissão são bem favoráveis, com boas localizações e elevações, com apenas um obstáculo mais crítico. Considerando que a antena transmissora fosse posicionada na altura de 58 m, dois metros a mais que o calculado para a altura da antena no primeiro enlace, tem-se o novo resultado mostrado pela Figura 32.

Figura 29 - Dimensionamento da altura das antenas para o cenário da Figura 31 considerando a torre de 60 m.

```
>> Dimensionamento_Altura_das_Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 6.125
Distância total do enlace (km): 18
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 7.54
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.46
Altitude da estação A (m): 915
Altitude da estação B (m): 593
Altura da antena A, tomada como referência (m): 58
Altitude do ponto crítico (m): 773
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de K mínimo: 0.55
Altura da Antena B para K = 4/3: -51.40 m
Altura da Antena B para K = mínimo: -49.60 m
```

Fonte: o autor.

O resultado obtido é negativo, isso significa que em qualquer altitude que a antena de recepção fosse colocada o enlace teria máxima eficiência, o que não é verdade, uma vez que aqui foi considerado apenas o terreno e não obstáculos como construções e vegetação, porém no local, atualmente, a Agroporto dispõe de uma torre de aproximadamente 30 m de altura, a qual era requisito para o projeto do silo construído, enquanto que as árvores chegam a atingir aproximadamente 20 m de altura, sendo assim, a antena de recepção pode ser posicionada em uma altitude mais estratégica, evitando o impacto dos potenciais obstáculos mencionados.

Figura 30 - Local da estação repetidora da fazenda Munari.



Fonte: Fotografia registrada pelo autor *in loco*.

3.4.4 Breve Estudo do Impacto da Frequência de Transmissão no Cálculos das Alturas das Antenas

Retornando ao enlace mais longo do *backbone* para fazer um estudo do impacto da frequência no dimensionamento da altura das antenas, são mantidos os valores inseridos no cálculo da Figura 30, exceto pela frequência, a qual foi feita uma alteração no código do Apêndice A (que pode ser vista no Apêndice B) para repetir o cálculo para diferentes valores de frequências, definidas por um intervalo, e no fim gerar um gráfico para facilitar a análise.

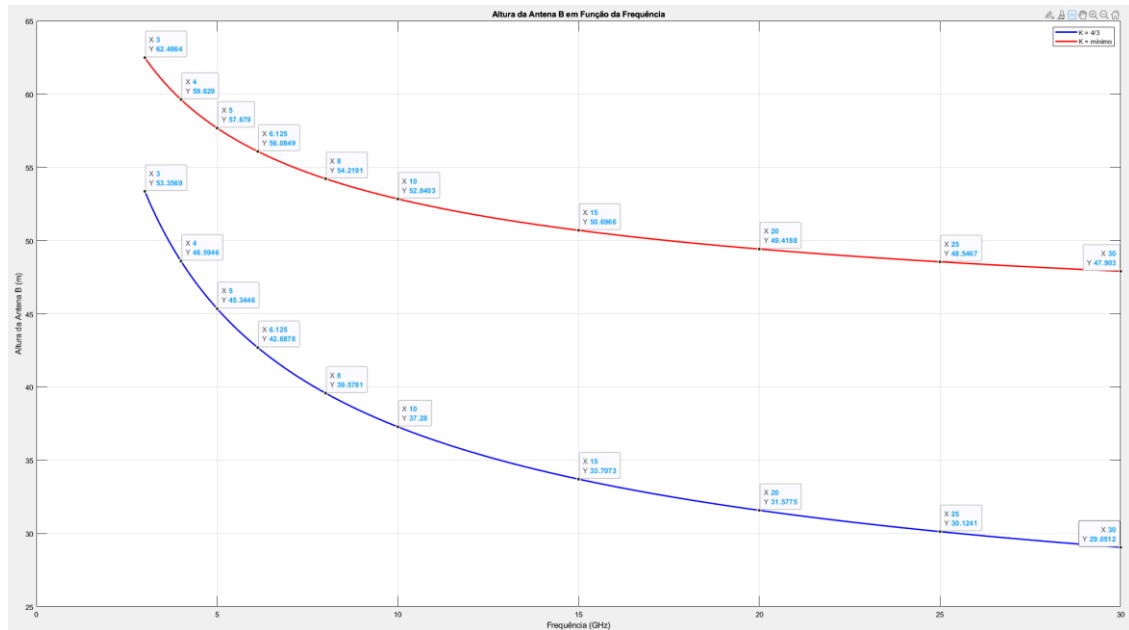
O intervalo de frequências escolhido para essa análise é todo o espectro SHF, conforme pode ser observado nas Figuras 34 e 35.

Figura 31 - Valores de entradas para dimensionamento da altura das antenas para o cenário da figura 28 considerando o intervalo de frequências SHF.

```
>> Estudo_Frequencias_Dimensionamento_Alturas
Frequência de transmissão inicial (GHz): 3
Frequência de transmissão final (GHz): 30
Distância total do enlace (km): 65.8
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 55.2
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.6
Altitude da estação A (m): 847
Altitude da estação B (m): 915
Altura da antena A, tomada como referência (m): 127
Altitude do ponto crítico (m): 905
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kminimo: 0.85
```

Fonte: o autor.

Figura 32 - Gráfico dos valores de altura da Antena B calculados em função do intervalo de frequência SHF.



Fonte: o autor.

Observando o gráfico pode-se concluir que quanto maior a frequência, menor é a altura que as antenas precisariam ser instaladas para atender os critérios de visibilidade, isso ocorre, pois, a frequência e o comprimento de onda são inversamente relacionados – Equação 2.1 - e a zona de Fresnel depende do comprimento de onda, sendo que, quanto menor o comprimento – frequências maiores – menor é o tamanho da área do elipsoide que precisa estar livre de obstáculos. A altura das antenas em relação ao solo afeta diretamente o tamanho da zona de Fresnel. Quanto maior a altura das antenas, maior será o raio da zona de Fresnel em um determinado ponto do enlace. Portanto, a utilização de frequências mais altas poderá reduzir a altura das antenas e ainda manter a zona de Fresnel desobstruída.

Apesar da conclusão anterior, não se é certo afirmar que o uso de frequências maiores é mais vantajoso, pois uma série de fatores devem ser considerados. As frequências mais altas podem ser mais suscetíveis à absorção atmosférica e a obstáculos como árvores e edifícios, além de serem mais afetadas pelas chuvas e outras intempéries climáticas como pode ser visto mais adiante.

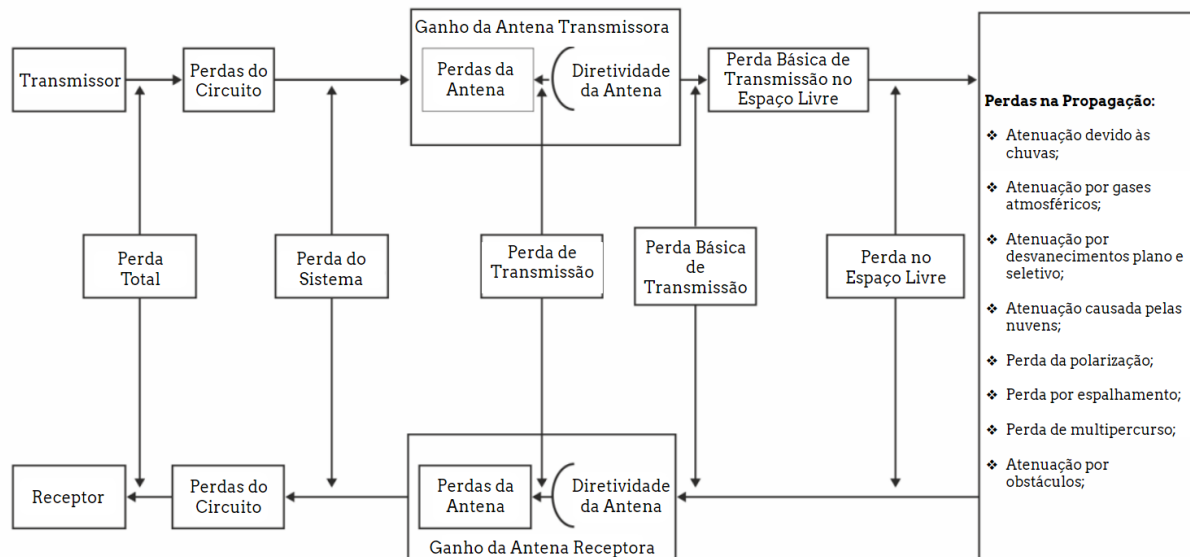
3.4.5 Atenuação Total do Enlace

A compreensão das diferentes fontes de atenuação no enlace de micro-ondas é fundamental para realizar um *link budget* preciso. Um *link budget*, que é uma análise detalhada das perdas e dos ganhos do sistema de comunicação, permite dimensionar o enlace de forma eficiente, evitando superdimensionamento e economizando recursos.

Ao estimar as atenuações causadas por obstáculos, incluindo terreno, vegetação, condições climáticas e outros elementos, pode-se calcular a potência do sinal esperada no receptor. Isso é crucial para garantir que o sistema funcione de maneira confiável, atendendo aos requisitos de desempenho sem a necessidade de se investir em equipamentos excessivamente caros.

Os cálculos apresentados neste tópico estão de acordo com a recomendação ITU-R P.341 “O conceito de perda de transmissão para enlaces de rádio”, disponível em (29). A Figura 36 representa bem as perdas que devem ser consideradas na transmissão.

Figura 33 - Representação gráfica dos termos usados nos conceitos de perda de transmissão.



Fonte: extraído e editado de (30).

3.4.5.1 Perdas no Espaço Livre

Neste primeiro momento, são analisadas as perdas que independem das características dos equipamentos de transmissão e de recepção escolhidos no projeto. Essas perdas são apresentadas na seção 3.6.

Implementando as equações vistas nas seções 2.2.6 e 2.7 no código do Apêndice A, obtêm-se o Apêndice C, o qual facilitará tanto o dimensionamento da altura das antenas quanto os cálculos das perdas de propagação e no espaço livre para diferentes características de enlace.

Para os dois enlaces que compõem o *backbone* é feito o estudo das perdas para diferentes valores de frequência de transmissão, sendo elas: 3 GHz, 6 GHz e 15 GHz, e como o foco neste momento é avaliar o efeito de cada frequência nas atenuações, a altura da antena de recepção é fixada em 56 m – valor obtido no dimensionamento da altura das antenas - para a estação do Munari e 30 m – altura máxima da torre existente no local atualmente - para a estação na fazenda Agroporto.

As Figuras 37 até 48 são registros extraídos da ferramenta Matlab, contendo as informações já vistas no estudo do dimensionamento da altura das antenas, agora com a adição do cálculo de perdas, os resultados são discutidos logo em seguida.

Figura 34 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 3 \text{ GHz}$.

```
>> Estudo_de_Perdas
Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 3
Distância total do enlace (km): 65.8
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 55.2
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.6
Altitude da estação A (m): 847
Altitude da estação B (m): 915
Altura da antena A, tomada como referência (m): 127
Altitude do ponto crítico (m): 905
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kmínimo: 0.85

Escolha:
[1] Para usar o valor calculado da antena
[2] - Para inserir um valor manual: 2
Digite o valor da altura da antena de recepção: 56

Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): 100
Coeficiente K_V para polarização vertical: 0.0001942
Coeficiente K_H para polarização horizontal: 0.0001390
Coeficiente alpha_V para polarização vertical: 1.0688
Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: 1.2322
Coeficiente de Latitude: 0
Valor do fator Co: 8
Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): 20
Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): 0.0070
Valor de absorção devido ao vapor d'água (dB/Km): 0
```

Fonte: o autor.

Figura 35 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 3 \text{ GHz}$.

```

RESULTADOS OBTIDOS
Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta
Altura da Antena B para K = 4/3: 53.36 m
Altura da Antena B para K = mínimo: 62.49 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 56.00 m

Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
Polarização Horizontal: 0.28 dB
Polarização Vertical: 0.19 dB
Polarização Circular: 0.23 dB
Polarização Elíptica: 0.18 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
Plano: 32.31 %
Seletivo: 0.08 %

Atenuação Total do Enlace Prevista para:
Polarização Horizontal: 139.10 dB
Polarização Vertical: 139.00 dB
Polarização Circular: 139.05 dB
Polarização Elíptica: 138.99 dB

```

Fonte: o autor.

Figura 36 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 3 \text{ GHz}$.

```

>> Estudo_de_Perdas
Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 3
Distância total do enlace (km): 18
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 7.54
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.46
Altitude da estação A (m): 915
Altitude da estação B (m): 593
Altura da antena A, tomada como referência (m): 56
Altitude do ponto crítico (m): 773
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kmínimo: 0.55

Escolha:
[1] Para usar o valor calculado da antena
[2] - Para inserir um valor manual: 2
Digite o valor da altura da antena de recepção: 30

Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): 100
Coeficiente K_V para polarização vertical: 0.0001942
Coeficiente K_H para polarização horizontal: 0.0001390
Coeficiente alpha_V para polarização vertical: 1.0688
Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: 1.2322
Coeficiente de Latitude: 0
Valor do fator Co: 6
Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): 20
Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): 0.0070
Valor de absorção devido ao vapor d'água (dB/Km): 0

```

Fonte: o autor.

Figura 37 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 3 \text{ GHz}$.

```

RESULTADOS OBTIDOS
Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta
Altura da Antena B para K = 4/3: -33.62 m
Altura da Antena B para K = mínimo: -37.83 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 30.00 m

Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
Polarização Horizontal: 0.22 dB
Polarização Vertical: 0.15 dB
Polarização Circular: 0.18 dB
Polarização Eliptica: 0.14 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
Plano: 0.44 %
Seletivo: 0.00 %

Atenuação Total do Enlace Prevista para:
Polarização Horizontal: 127.44 dB
Polarização Vertical: 127.37 dB
Polarização Circular: 127.41 dB
Polarização Eliptica: 127.36 dB

```

Fonte: o autor.

Figura 38 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 6 \text{ GHz}$.

```

>> Estudo_de_Perdas
Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 6
Distância total do enlace (km): 65.8
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 55.2
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.6
Altitude da estação A (m): 847
Altitude da estação B (m): 915
Altura da antena A, tomada como referência (m): 127
Altitude do ponto crítico (m): 905
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kmínimo: 0.85

Escolha:
[1] Para usar o valor calculado da antena
[2] - Para inserir um valor manual: 2
Digite o valor da altura da antena de recepção: 56

Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): 100
Coeficiente K_V para polarização vertical: 0.0004878
Coeficiente K_H para polarização horizontal: 0.0007056
Coeficiente alpha_V para polarização vertical: 1.5728
Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: 1.5900
Coeficiente de Latitude: 0
Valor do fator Co: 8
Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): 20
Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): 0.0073
Valor de absorção devido ao vapor d'água (dB/Km): 0.0018

```

Fonte: o autor.

Figura 39 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 6 \text{ GHz}$.

```

RESULTADOS OBTIDOS
Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta
Altura da Antena B para K = 4/3: 42.95 m
Altura da Antena B para K = mínimo: 56.24 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 56.00 m

Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
Polarização Horizontal: 7.46 dB
Polarização Vertical: 4.76 dB
Polarização Circular: 6.11 dB
Polarização Elíptica: 4.46 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
Plano: 59.88 %
Seletivo: 0.13 %

Atenuação Total do Enlace Prevista para:
Polarização Horizontal: 152.43 dB
Polarização Vertical: 149.74 dB
Polarização Circular: 151.08 dB
Polarização Elíptica: 149.44 dB

```

Fonte: o autor.

Figura 40 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 6 \text{ GHz}$.

```

>> Estudo_de_Perdas
Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 6
Distância total do enlace (km): 18
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 7.54
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.46
Altitude da estação A (m): 915
Altitude da estação B (m): 593
Altura da antena A, tomada como referência (m): 56
Altitude do ponto crítico (m): 773
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kmínimo: 0.55

Escolha:
[1] Para usar o valor calculado da antena
[2] - Para inserir um valor manual: 2
Digite o valor da altura da antena de recepção: 30

Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): 100
Coeficiente K_V para polarização vertical: 0.0004878
Coeficiente K_H para polarização horizontal: 0.0007056
Coeficiente alpha_V para polarização vertical: 1.5728
Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: 1.5900
Coeficiente de Latitude: 0
Valor do fator Co: 6
Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): 20
Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): 0.0073
Valor de absorção devido ao vapor d'água (dB/Km): 0.0018

```

Fonte: o autor.

Figura 41 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 6 \text{ GHz}$.

```

RESULTADOS OBTIDOS
Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta
Altura da Antena B para K = 4/3: -48.26 m
Altura da Antena B para K = mínimo: -46.61 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 30.00 m

Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
Polarização Horizontal: 5.82 dB
Polarização Vertical: 3.72 dB
Polarização Circular: 4.77 dB
Polarização Eliptica: 3.48 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
Plano: 0.82 %
Seletivo: 0.01 %

Atenuação Total do Enlace Prevista para:
Polarização Horizontal: 139.10 dB
Polarização Vertical: 137.00 dB
Polarização Circular: 138.05 dB
Polarização Eliptica: 136.77 dB

```

Fonte: o autor.

Figura 42 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 15 \text{ GHz}$.

```

>> Estudo_de_Perdas
Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 15
Distância total do enlace (km): 65.8
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 55.2
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.6
Altitude da estação A (m): 847
Altitude da estação B (m): 915
Altura da antena A, tomada como referência (m): 127
Altitude do ponto crítico (m): 905
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kmínimo: 0.85

Escolha:
[1] Para usar o valor calculado da antena
[2] - Para inserir um valor manual: 2
Digite o valor da altura da antena de recepção: 56

Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): 100
Coeficiente K_V para polarização vertical: 0.05008
Coeficiente K_H para polarização horizontal: 0.04481
Coeficiente alpha_V para polarização vertical: 1.0440
Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: 1.1233
Coeficiente de Latitude: 0
Valor do fator Co: 8
Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): 20
Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): 0.0090
Valor de absorção devido ao vapor d'água (dB/Km): 0.0150

```

Fonte: o autor.

Figura 43 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Fomus – Munari para $f = 15 \text{ GHz}$.

```

RESULTADOS OBTIDOS
Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta
Altura da Antena B para K = 4/3: 33.71 m
Altura da Antena B para K = mínimo: 50.70 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 56.00 m

Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
Polarização Horizontal: 55.19 dB
Polarização Vertical: 42.81 dB
Polarização Circular: 49.00 dB
Polarização Eliptica: 42.03 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
Plano: 135.34 %
Seletivo: 0.22 %

Atenuação Total do Enlace Prevista para:
Polarização Horizontal: 209.11 dB
Polarização Vertical: 196.73 dB
Polarização Circular: 202.92 dB
Polarização Eliptica: 195.95 dB

```

Fonte: o autor.

Figura 44 - Valores de entrada para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 15 \text{ GHz}$.

```

>> Estudo_de_Perdas
Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das Antenas
Frequência de transmissão (GHz): 15
Distância total do enlace (km): 18
Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): 7.54
Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): 10.46
Altitude da estação A (m): 915
Altitude da estação B (m): 593
Altura da antena A, tomada como referência (m): 56
Altitude do ponto crítico (m): 773
Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): 0
Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): 0
Valor de Kminimo: 0.55

Escolha:
[1] Para usar o valor calculado da antena
[2] - Para inserir um valor manual: 2
Digite o valor da altura da antena de recepção: 30

Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): 100
Coeficiente K_V para polarização vertical: 0.05008
Coeficiente K_H para polarização horizontal: 0.04481
Coeficiente alpha_V para polarização vertical: 1.0440
Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: 1.1233
Coeficiente de Latitude: 0
Valor do fator Co: 6
Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): 20
Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): 0.0090
Valor de absorção devido ao vapor d'água (dB/Km): 0.0150

```

Fonte: o autor.

Figura 45 - Resultado para estimativa das perdas no espaço livre para o enlace Munari – Agroporto para $f = 15 \text{ GHz}$.

```

RESULTADOS OBTIDOS
Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta
Altura da Antena B para K = 4/3: -61.25 m
Altura da Antena B para K = mínimo: -54.40 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 30.00 m

Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
Polarização Horizontal: 43.06 dB
Polarização Vertical: 33.40 dB
Polarização Circular: 38.23 dB
Polarização Elíptica: 32.79 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
Plano: 1.84 %
Seletivo: 0.01 %

Atenuação Total do Enlace Prevista para:
Polarização Horizontal: 184.57 dB
Polarização Vertical: 174.91 dB
Polarização Circular: 179.74 dB
Polarização Elíptica: 174.30 dB

```

Fonte: o autor.

Obs.: vale lembrar que os valores de entradas inseridos para a estimativa das perdas foram extraídos de:

- **Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo** – Figura 19, onde a localidade deste estudo faz parte da região P, ou seja, 145 mm/h, mas que, como manda a recomendação da ITU, considera-se 100 mm/h;
- **Coefficientes K e α** – Tabela 3, variando de acordo com a frequência de transmissão;
- **Atenuação Causada Pelos Gases Atmosféricos** – Figura 21, o qual o valor também varia de acordo com a frequência;
- **Coefficiente de Latitude** – apresentado na seção 2.9.1 desta dissertação;
- **Fator C_0** – Tabela 4, valor dependente da altura da antena em relação ao nível do mar e o tipo de terreno (o qual no caso para todas os enlaces estudados neste documento é o tipo rugoso);
- **Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100 N/Km no pior mês do ano** – Figura 22, o qual segundo a recomendação, no Brasil, fica em torno de 15% e 25%, sendo assim foi considerado 20% para todos os casos.

3.4.5.2 Análise dos Resultados Obtidos

Para uma análise mais eficiente os resultados foram organizados na forma de tabela:

Tabela 9 – Valores de atenuação em dB na propagação no espaço livre para diferentes frequências e tipos de polarização.

Frequência Polarização	FOMUS - MUNARI			MUNARI - AGROPORTO		
	3 GHz	6 GHz	15 GHz	3 GHz	6 GHz	15 GHz
Horizontal	139,10	152,43	209,11	127,44	139,10	184,57
Vertical	139,00	149,74	196,73	127,37	137,00	174,91
Circular	139,05	151,08	202,92	127,41	138,05	179,74
Elíptica	138,99	149,44	195,95	127,36	136,77	174,30

Fonte: o autor.

Pela Tabela 9, pode-se concluir que para frequências maiores a atenuação aumenta, o que já era esperado a partir do que foi visto no referencial teórico, onde principalmente a chuva é um fator atenuante crítico para frequências acima de 8 GHz, como pode ser visto na tabela 10, além da onda sofrer mais dispersão. Entre as frequências de 3 e 6 GHz, o aumento da atenuação não foi tão grande quanto em 15 GHz, sendo assim, a largura de banda maior e as técnicas de modulação mais avançadas, disponíveis ao utilizar a frequência mais próxima de 6 GHz, são fatores decisivos na escolha da frequência.

Em relação à distância do enlace, o que se pode concluir é que enlaces mais longos sofrem mais os efeitos da atenuação, o que era esperado, e os enlaces menores sofrem menos, ainda que na frequência de 15 GHz continue a ter uma atenuação considerável.

Dentre os quatro tipos de polarização estudados, a vertical e a elíptica apresentam menor atenuação, para frequências menores o impacto foi menor entre os tipos, mas em frequências maiores a vantagem destes dois tipos de polarização é considerável, como pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10 – Atenuação causada pela chuva para 0,01% do tempo em dB na propagação no espaço livre para diferentes frequências e tipos de polarização.

Frequência Polarização	FOMUS - MUNARI			MUNARI - AGROPORTO		
	3 GHz	6 GHz	15 GHz	3 GHz	6 GHz	15 GHz
Horizontal	0,28	7,46	55,19	0,22	5,82	43,06
Vertical	0,19	4,76	42,81	0,15	3,72	33,40
Circular	0,23	6,11	49,00	0,18	4,77	38,23
Elíptica	0,18	4,46	42,03	0,14	3,48	32,79

Fonte: o autor.

Tabela 11 – Probabilidade de desvanecimento em porcentagem na propagação no espaço livre para diferentes frequências.

Frequência Polarização	FOMUS - MUNARI			MUNARI - AGROPORTO		
	3 GHz	6 GHz	15 GHz	3 GHz	6 GHz	15 GHz
Plano	32,31	59,88	135,34	0,44	0,82	1,84
Seletivo	0,08	0,13	0,22	0,00	0,01	0,01

Fonte: o autor.

Por fim, quanto ao desvanecimento, analisando os resultados na Tabela 11 conclui-se que distâncias maiores de enlaces aumentam a probabilidade de desvanecimento plano, afirmação válida para a frequência também neste caso, onde ao se utilizar de 15 GHz o desvanecimento plano se torna uma certeza, já que sua probabilidade de ocorrência fica acima de 100%. Um enlace mais curto como o Munari – Agroporto que possui 18 km de extensão tem probabilidade bem baixa de ocorrência do desvanecimento plano, onde até frequências mais altas como a de 15 GHz continuam viáveis.

Quanto ao desvanecimento seletivo, a sua probabilidade de ocorrência é mínima para os dois enlaces estudados, tendo um leve aumento para distâncias e frequências maiores.

3.5 PATHLOSS 5.0

PathLoss é uma ferramenta essencial e poderosa amplamente utilizada na área da engenharia de telecomunicações. Esta ferramenta é amplamente reconhecida por sua capacidade de modelar e analisar as características de propagação de ondas de rádio, o que desempenha um papel crucial no planejamento, na otimização e no projeto de sistemas de comunicação.

A ferramenta oferece um ambiente de simulação que permite aos engenheiros e projetistas prever com precisão a propagação das ondas de rádio em diferentes ambientes e condições. Ela incorpora uma variedade de modelos de propagação, como o modelo de Okumura-Hata e o modelo de desvanecimento de Rayleigh, para prever perdas de percurso, atenuação e desvanecimento em vários cenários, incluindo áreas urbanas, suburbanas e rurais.

Uma das características notáveis do PathLoss 5.0 é sua capacidade de considerar fatores como terreno, relevo, altura das antenas, frequência de operação e outras variáveis específicas do sistema em análise. Além disso oferece recursos avançados, como cálculos de raio de Fresnel, análise de interferência, análise de probabilidade de desvanecimento e muito mais. Isso permite que os engenheiros otimizem o design e o desempenho dos sistemas de comunicação, garantindo que atendam aos requisitos de cobertura e capacidade. O software pode ser adquirido no site oficial disponível em (31).

3.5.1 Inserção dos Enlaces no Software

Esta monografia apresenta um guia abrangente e detalhado que visa fornecer um passo a passo elucidativo e prático, enriquecido com imagens e instruções. A intenção é que este guia seja não apenas uma parte integral do trabalho, mas também um recurso valioso para aqueles que o consultarem no futuro.

Ao executar o Pathloss é apresentado a janela principal de construção do perfil do enlace, como é mostrado na Figura 49.

Figura 46 - Janela inicial do programa Pathloss 5.0.



Fonte: o autor.

Para inserir as estações que fazem parte do projeto, deve-se clicar no ícone circulado em vermelho na Figura 49, o qual é nomeado como “*Site List*”, onde uma janela separada é aberta apresentando uma tabela com campos para inserir as características de cada estação como nome, latitude, longitude e etc. Na Figura 50, é apresentada a lista já preenchida com os parâmetros dos enlaces de estudo.

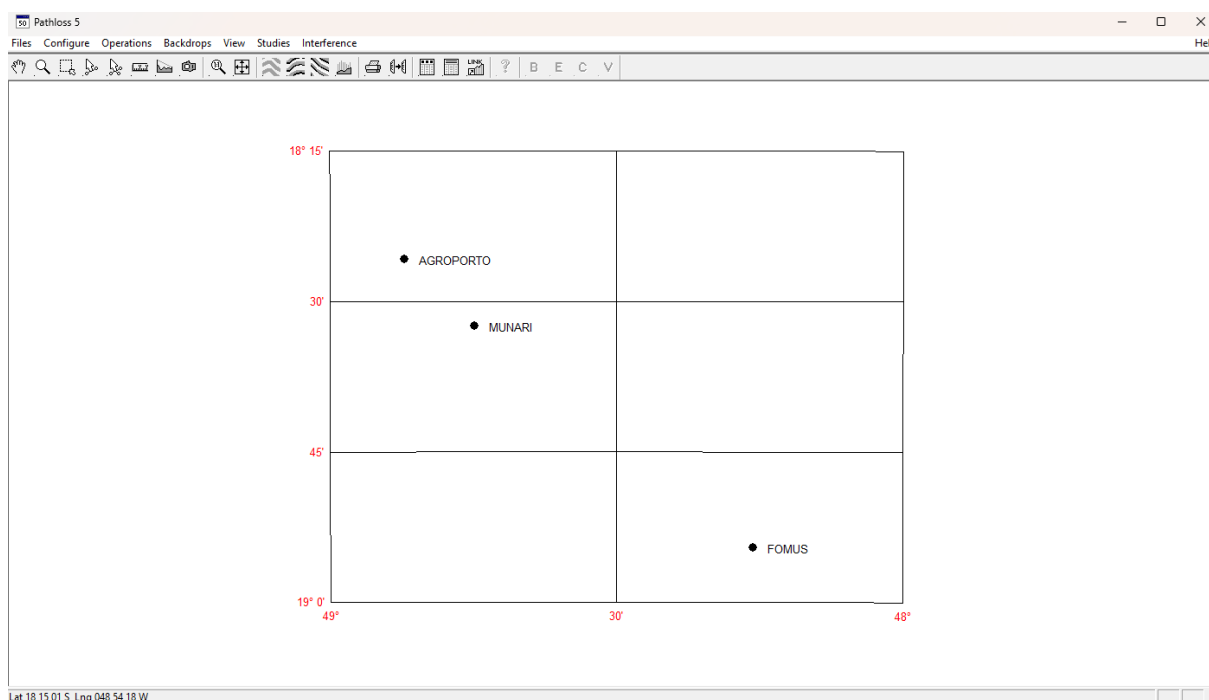
Figura 47 - Janela onde se configura a localidade e características iniciais de cada enlace do projeto.

	Site name	Latitude	Longitude	Call sign	Station code	Elevation (m)	Tower height (m)	Tower type	Site type	Site status	Base station	Show local study	Show area study
1	FOMUS	18 54 30.70 S	048 15 41.40 W			847.0	127.0	building mount	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	MUNARI	18 32 27.90 S	048 44 52.40 W			915.0	48.0	guyed	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	AGROPORTO	18 25 44.70 S	048 52 11.70 W			593.0	30.0	self supporting	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4								unknown	not defined	not specified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: o autor.

Após definir as características de localidade das estações, baseados nos dados das Tabelas 7 e 8, basta fechar a janela para que elas sejam apresentadas no mapa do programa, o qual, nesta versão, os dados de terreno não são inseridos automaticamente e por isso ele apresenta apenas uma carta cartográfica em branco cobrindo a área das localidades adicionadas, como mostra a Figura 51.

Figura 48 - Região de estudo com as estações mapeadas.

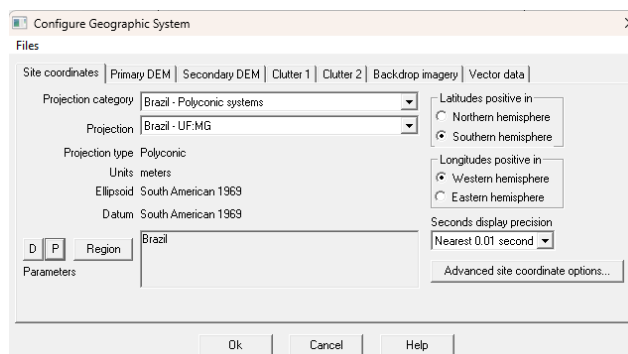


Fonte: o autor.

3.5.2 Inserção do Modelo Digital de Elevação

Para inserir o banco de dados relacionado ao terreno, é necessário primeiramente clicar em “Configure” e no sub-menu que irá abrir clicar em “Set GIS configuration”, a janela de configurações será aberta e é apresentada na Figura 52.

Figura 49 - Primeira etapa na inserção do banco de dados de terreno da região.



Fonte: o autor.

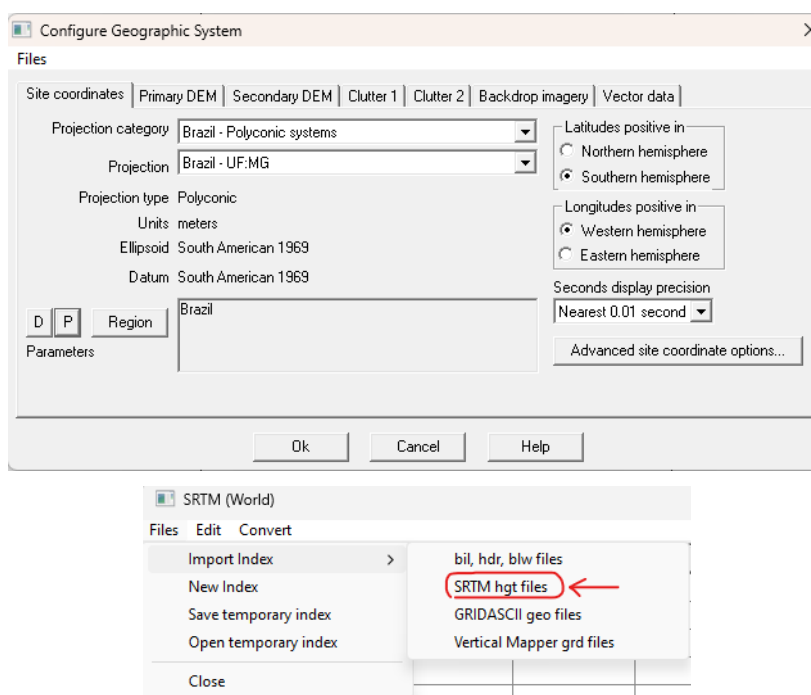
No menu “*Primary DEM*” da Figura 52 é aonde deve ser incluído o banco de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da região.

O SRTM é um modelo digital da superfície da Terra que fornece informações detalhadas sobre a topografia, ou seja, a elevação do terreno. Ele é produzido a partir de dados coletados por um radar de abertura sintética a bordo da missão espacial *Shuttle Radar Topography*, que foi lançada em 2000 (32).

O modelo é uma colaboração entre várias agências espaciais, incluindo a NASA (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos EUA) e o NGA (Agência Nacional Geoespacial dos EUA), com o objetivo de mapear a topografia global da Terra. O radar de abertura sintética a bordo do ônibus espacial coletou dados de elevação para quase toda a superfície da Terra, excluindo áreas polares extremas (32).

Os dados SRTM para a região de estudo foram extraídos de (33), nesta referência estão todas as instruções para a obtenção dos dados. Na janela da Figura 53, deve-se clicar em “*Setup*” para definir o diretório do banco de dados e em “*File Index*” para acrescentar os dados a serem utilizados.

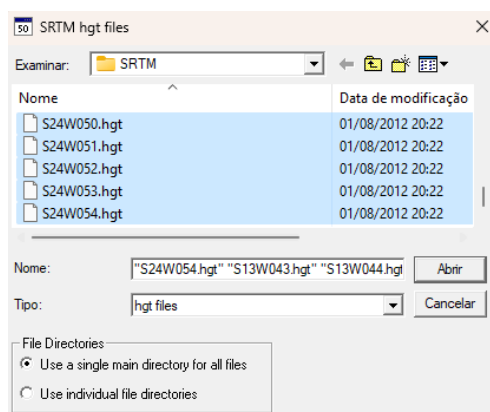
Figura 50 - Segunda etapa na inserção do banco de dados de terreno da região.



Fonte: o autor.

Basta selecionar todos os arquivos baixados referentes a região de interesse para adiciona-los ao projeto como mostra a Figura 54.

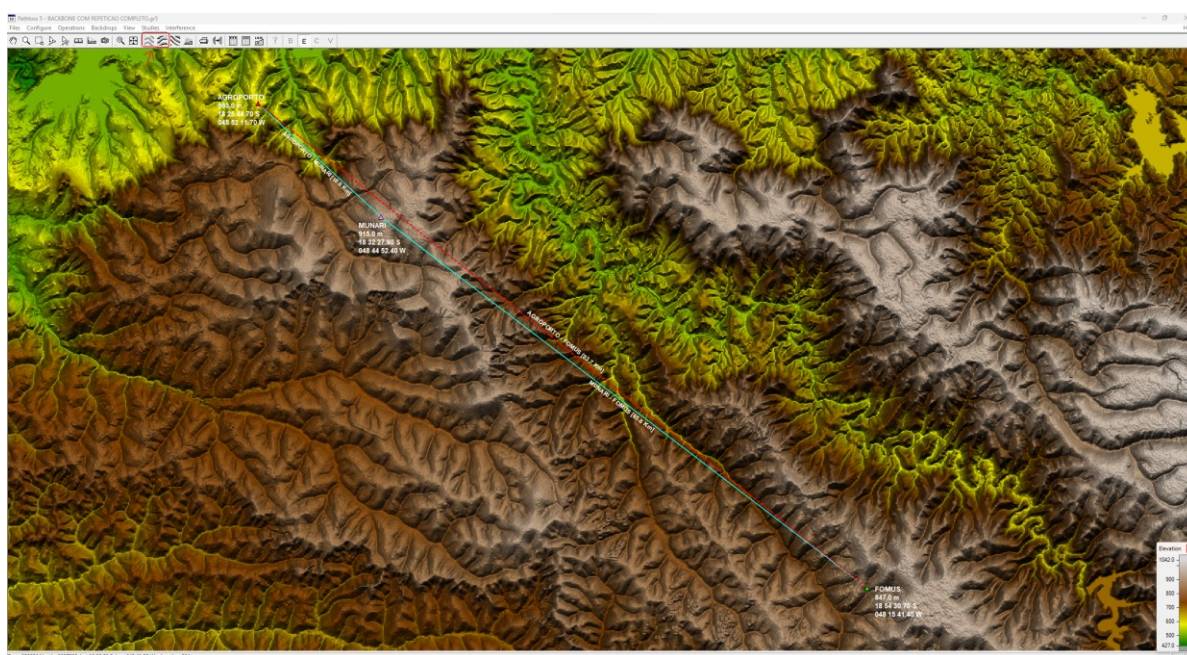
Figura 51 - Terceira etapa na inserção do banco de dados de terreno da região.



Fonte: o autor.

Na Figura 55 os enlaces estão posicionados corretamente e o perfil de terreno inserido, onde foi utilizado as duas opções do programa circulado em vermelho na figura, os quais geram o perfil de acordo com o banco de dados adicionado. As instruções de personalização podem ser encontradas na documentação oficial do software disponível em (31).

Figura 52 - Perfil de terreno gerado e enlaces posicionados.



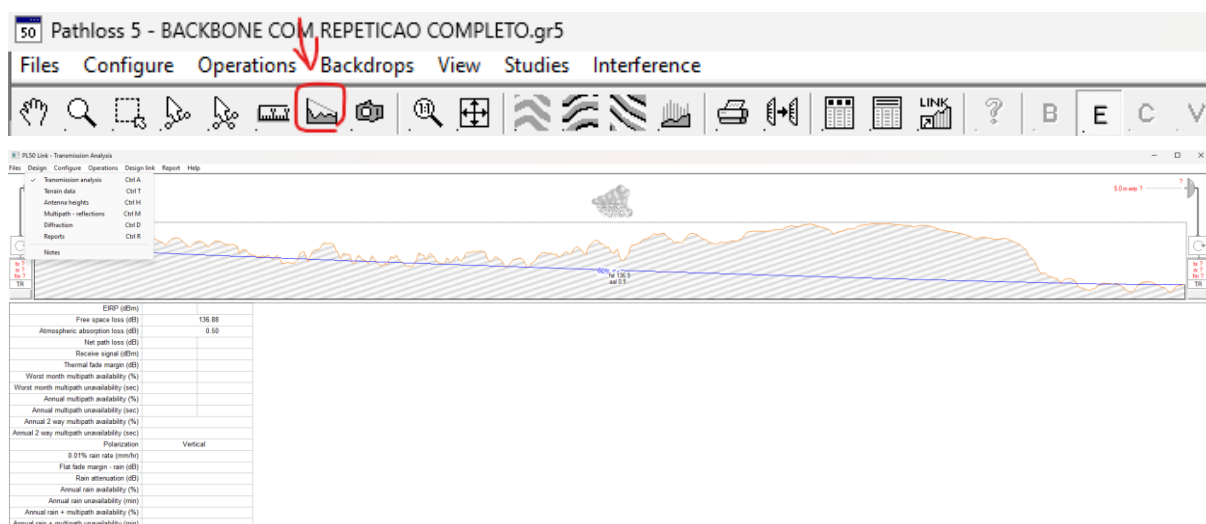
Fonte: o autor.

A partir desta etapa, já é possível fazer o dimensionamento dos enlaces, na Figura 55 o enlace sem repetição, o qual já é conhecido a inviabilidade, está representado pela linha tracejada vermelha, enquanto os enlaces foco deste estudo são representados pela linha sólida ciano.

3.5.3 Dimensionamento dos Enlaces no Software

Para dimensionar o enlace pode ser utilizada a ferramenta facilitada chamada “*Generate Profile*” circulada na Figura 56, a qual permite clicar com o *mouse* na estação de transmissão e arrastar até a estação de recepção, enquanto em tempo real vai sendo mostrado o perfil de elevação do caminho, e após soltar o botão do *mouse* no local desejado, uma nova janela é aberta executando outra instância do software que se chama “*PL50 Link Analysis*”, basta fazer o ajuste fino dos dados reais do enlace.

Figura 53 - Janela de definições de cada aspecto do enlace.



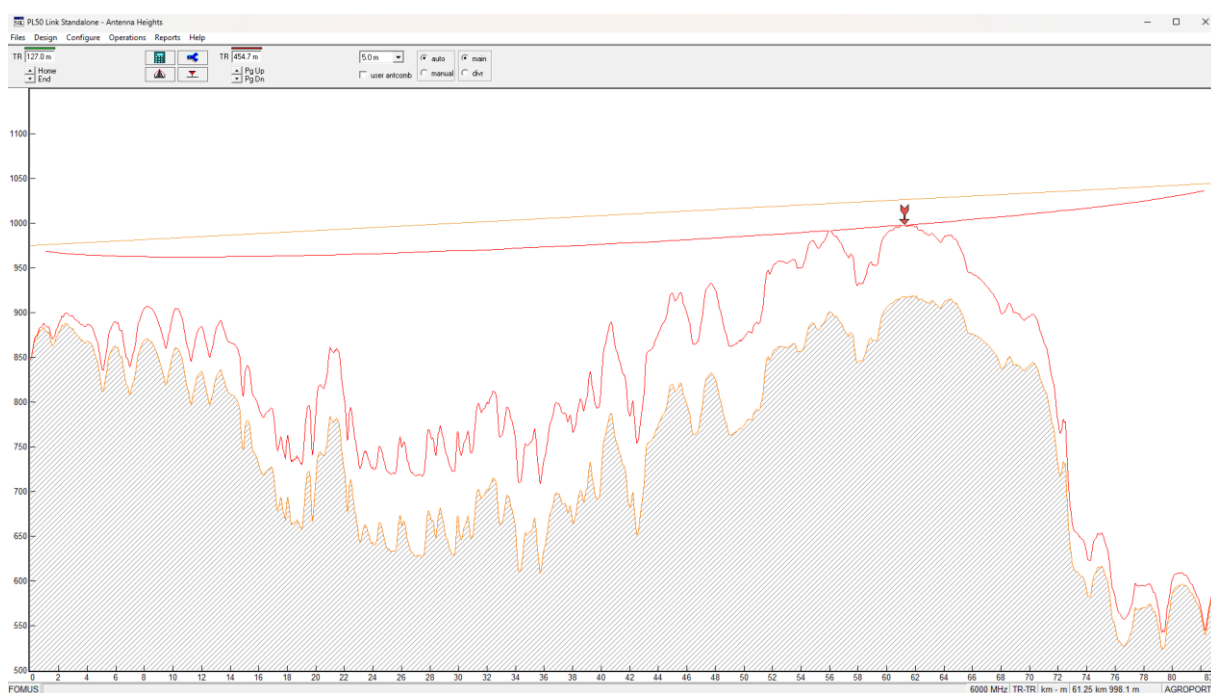
Fonte: o autor.

A interface é simples e amigável, para definir cada parâmetro do projeto basta dar um clique no que se deseja configurar, por exemplo ao clicar na antena uma nova janela é aberta para inserir os parâmetros da mesma.

3.5.3.1 Enlace Fomus até Agroporto

Devido a inviabilidade do enlace se estendendo da Fomus até a Agroporto, as etapas de sua configuração são omitidas, sendo apresentado apenas o resultado final na Figura 57.

Figura 54 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Fomus - Agroporto.



Fonte: o autor.

Como previsto pelos resultados do cálculo teórico apresentados na Figura 26, para este enlace, o software estimou uma altura da antena de 454,7 m, isso para atender apenas ao critério de $K = 4/3$, o que não seria possível.

3.5.3.2 Enlace Fomus até Munari

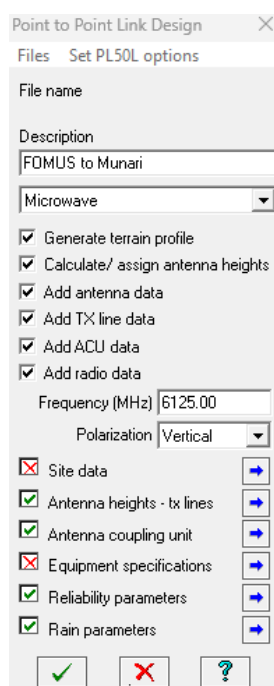
Como o foco principal desta monografia é o estudo do enlace em questão, e no Capítulo 5 é mostrada a comparação entre as estimativas do projeto e os valores da estrutura real, neste

ponto já são usados parâmetros dos equipamentos o mais próximo do real e também já será considerada a torre localizada na fazenda Munari, apesar disso, os dados técnicos e as características dos equipamentos são apresentados apenas no Capítulo 4.

Para uma estimativa mais precisa, a ferramenta “*Generate Profile*” não é utilizada aqui, mas sim a inserção dos dados manualmente a partir da opção “*Design Link*” na instância “*PL50 Link Analysis*”.

Na janela da Figura 58 basta definir o valor de frequência e polarização, e clicar nas setas azuis para definir os outros parâmetros, onde a inserção destes dados para “*Site Data*” e “*Equipment specifications*” são obrigatórias, mostradas pelas Figuras 59 até 62.

Figura 55 - Características do Enlace.



Fonte: o autor.

Figura 56 - Dados das estações.

Site Data		
	Site 1	Site 2
Site name	FOMUS	MUNARI
Latitude	18 54 30.70 S	18 32 27.90 S
Longitude	048 15 41.40 W	048 44 52.40 W
True azimuth (°)	308.3319	128.4881
Path length (km)	65.464	
Elevation (m)	847.00	915.00
Tower type	building mount	guyed
Tower height (m)	127.00	48.00
Minimum antenna height (m)	125.00	25.00
Address		
City	Uberlândia	Tupaciguara
State	Minas Gerais	Minas Gerais
Country	Brasil	Brasil
Owner code		
Call sign		
Station code		
Operator code		

Fonte: o autor.

Figura 57 - Parâmetros da antena escolhida para a simulação.

	Antenna code	Folder	Manufacturer	Model	Gain (dbi)	Low frequency (MHz)	High frequency (MHz)	3 dB beamwidth (°)	Technology
37	26221	c:\pathloss\le	Andrew	PL4-65D	36.3	6425.0	7125.0	2.5	Aperture





Fonte: o autor.

Figura 58 - Parâmetros do rádio escolhido para a simulação.

	Radio code	Manufacturer	Model	Signal	Low frequency (MHz)	High frequency (MHz)	Technology	Folder
23	p+l6g_stm1_	NEC	PASOLINK+ L6G 155MB	1STM1-128QAM	5925.0	6425.0	Microwave	c:\pathloss\le

Fonte: o autor.

Figura 59 - Valor de K_{\min} indicado pelo software.

Diffraction Loss

path length (km) 65.46

Value of K exceeded for 99.99% of 0.851
the worst month in a continental
temperate climate

diffraction loss at K = 0.851 6.02 dB

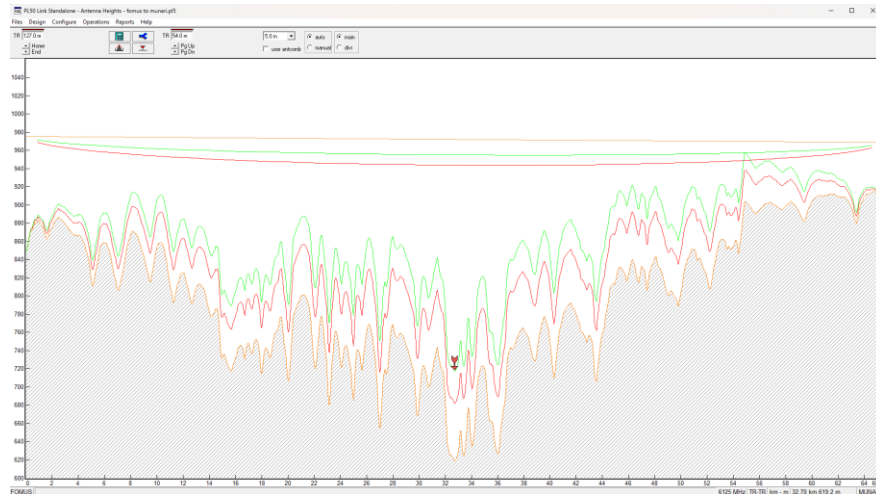
diffraction loss at K =

Fonte: o autor.

A Figura 63 apresenta a recomendação de altura da antena na estação Munari calculada pelo Pathloss respeitando os critérios de visibilidade definidos pela ITU. A linha vermelha representa 100 % de desobstrução para $K_{\text{médio}}$ e a verde 60 % para $K_{\text{mín}}$. Seguindo estes critérios a antena deveria ser fixada na altura de 54 m para que o *link* projetado seja confiável, ou seja,

acima da altura da torre existente atualmente no local. Novamente os resultados ficaram próximos ao calculado utilizando a ferramenta Matlab.

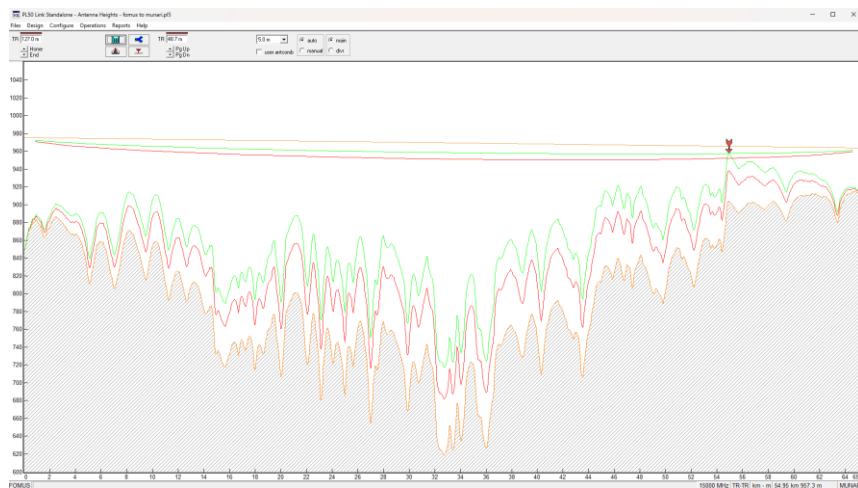
Figura 60 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Fomus - Munari.



Fonte: o autor.

A Figura 64 confirma outra conclusão feita durante o cálculo teórico, onde o aumento da frequência, neste caso de 6125 MHz para 15000 MHz permite que as antenas sejam instaladas em menores altitudes e ainda assim atenda ao critério de visibilidade, porém foi observado também que frequências maiores são mais afetadas pelas perdas de propagação, sendo necessária uma análise mais criteriosa de qual das opções é mais vantajosa no atendimento da demanda.

Figura 61 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Fomus – Munari usando frequência mais alta.



Fonte: o autor.

3.5.3.3 Enlace Munari até Agroporto

Como o enlace desta seção tem menor proporção foi feito a inserção de algumas vegetações ao longo do caminho variando entre 10 e 20 m de altura, com o auxílio do google Earth para um posicionamento mais preciso dos obstáculos.

A Figura 65 apresenta que mesmo com os obstáculos inseridos, a estrutura disponível em cada estação suporta as alturas das antenas indicadas para cumprimento dos critérios de visibilidade.

Figura 62 - Dimensionamento da altura das antenas para o enlace Munari - Agroporto.



Fonte: o autor.

3.6 CÁLCULO DO DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE

Todos os cálculos e parâmetros analisados neste estudo estão em conformidade com as diretrizes da recomendação ITU-R P.530. Esta recomendação estabelece os critérios e considerações essenciais para dimensionar adequadamente os enlaces de comunicação. Os

cálculos foram especialmente desenvolvidos para enlaces de visada direta, ou seja, sem obstruções, e se concentram principalmente nas faixas de frequência em SHF.

Para as análises realizadas são utilizados parâmetros técnicos reais dos equipamentos, com o objetivo de evitar superdimensionamentos e proporcionar uma avaliação o mais próxima possível das condições do mundo real.

Uma vez que o equipamento de rádio, tanto na estação transmissora quanto na receptora, no enlace estudado nesta monografia, está fixado junto à antena, as perdas no guia de onda são desconsideradas. Também não são utilizados atenuadores e não há atenuação por circuitos de ramificação. Devido à complexidade de se estimar a atenuação causadas por obstáculos, para essa avaliação didática eles são desconsiderados, salvo os obstáculos adicionados no Pathloss no enlace da Figura 65. Os parâmetros dos equipamentos podem ser verificados no Capítulo 4 de materiais e métodos.

Nesta seção é apresentado o cálculo teórico, utilizando o código do Apêndice D, o qual é o código já conhecido do Apêndice C com o incremento das equações vistas no referencial teórico dedicadas ao estudo da disponibilidade do sistema. Além disso, logo na sequência do cálculo teórico é apresentado o resultado simulado no Pathloss e feito a devida comparação.

O ganho das antenas para os estudos apresentados a seguir é de 34 dBi, potência na saída do rádio de 29 dBm, quanto às alturas das antenas, são considerados os resultados visto anteriormente estimados no Pathloss.

Por fim, vale ressaltar que no cálculo da indisponibilidade devido ao desvanecimento seletivo os seguintes valores são usados com base nos parâmetros médios adotados na referência (10):

- $WM = 30$; $WNM = 30$; $BM = 25$, $BNM = 20$; $Tr,M = 6,3$ ns; $Tr, NM = 6,3$ ns

3.6.1 Enlace Fomus até Munari

A Figura 66 apresenta os resultados obtidos utilizando o código do Apêndice D e a Figura 67 utilizando a ferramenta PathLoss.

Figura 63 - Resultados teóricos considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.

```

RESULTADOS OBTIDOS

DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DA ANTENA:
Altura da Antena B para K = 4/3: 42.69 m
Altura da Antena B para K = mínimo: 56.08 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 54.00 m

ATENUAÇÕES NO ESPAÇO LIVRE
Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
  Polarização Horizontal: 55.194139 dB
  Polarização Vertical: 42.813658 dB
  Polarização Circular: 49.003899 dB
  Polarização Elíptica: 42.031699 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
  Plano: 60.826471 %
  Seletivo: 0.128686 %

Atenuação Total do Enlace Prevista: 77.155420 dB

Potência do Sinal Recebido Previsto: -48.155420 dB

INDISPONIBILIDADE DO SISTEMA
Probabilidade de Disponibilidade devido atenuação da chuva para:
  Polarização Horizontal: 99.990615 %
  Polarização Vertical: 99.998331 %
  Polarização Circular: 99.995646 %
  Polarização Elíptica: 99.998548 %

Probabilidade de Disponibilidade devido ao desvanecimento plano: 99.987421 %
Probabilidade de Disponibilidade devido ao desvanecimento seletivo: 99.794038 %

Probabilidade total de ocorrência de SES: 0.218540 %

Tempo de interrupção do sistema no pior mês: 5664.568991 s

Disponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano e Seletivo: 99.934438 %

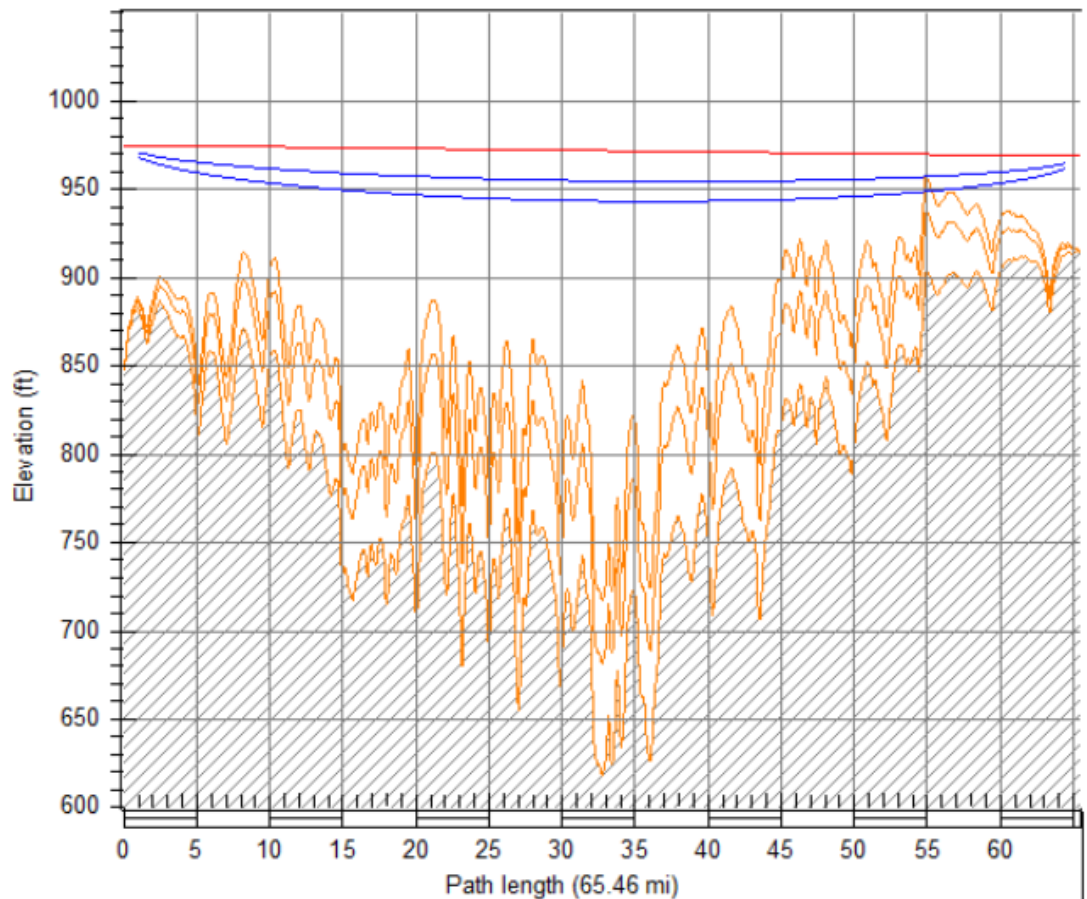
DISPONIBILIDADE TOTAL
  Polarização Horizontal: 99.925053 %
  Polarização Vertical: 99.932769 %
  Polarização Circular: 99.930084 %
  Polarização Elíptica: 99.932986 %

TEMPO DE INDISPONIBILIDADE NO ANO
  Polarização Horizontal: 393.919960 min
  Polarização Vertical: 353.367829 min
  Polarização Circular: 367.476722 min
  Polarização Elíptica: 352.224044 min

```

Fonte: o autor.

Figura 64 - Resultados simulados considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.



F = 6000.00 MHz K = 1.33, 0.85 %F1 = 100.0, 60.0, 60.0

	FOMUS	MUNARI
Latitude	18 54 30.70 S	18 32 27.90 S
Longitude	048 15 41.40 W	048 44 52.40 W
True azimuth (°)	308 19 54.98	128 29 17.10
Vertical angle (°)	000 14 16.33	000 12 15.43
Elevation (m)	848.03	914.77
Tower height (m)	127.00	48.00
Tower type	building mount	guyed
Antenna model	P4-65D	P4-65D
Antenna gain (dBi)	34.00	34.00
Antenna gain (dBd)	34.15	34.15
Antenna height (m)	127.00	54.03
TX loss (dB)	0.00	0.00
RX loss (dB)	0.00	0.00
Diffraction loss (dB)		0.85
Radio model	PASOLINK+ L6G 155MB	PASOLINK+ L6G 155MB
TX power (dBm)	29.00	29.00
EIRP (dBm)	63.00	63.00
TX channel assignments	71 5857.V	7h 6123.V
Receive signal (dBm)	-48.74	-48.74
Thermal fade margin (dB)	19.26	19.26
Annual 2 way multipath availability (%)		99.83935
Annual 2 way multipath unavailability (sec)		50662.29
Annual rain availability (%)		100.00000
Annual rain + multipath availability (%)		99.83935

Fonte: o autor.

3.6.2 Enlace Munari até Agroporto

A Figura 68 apresenta os resultados obtidos utilizando o código do Apêndice D e a Figura 69 utilizando a ferramenta PathLoss.

Figura 65 - Resultados teóricos considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.

```

RESULTADOS OBTIDOS

DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DA ANTENA:
Altura da Antena B para K = 4/3: -27.81 m
Altura da Antena B para K = mínimo: -26.02 m
Altura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de atenuações: 14.00 m

ATENUAÇÕES NO ESPAÇO LIVRE
Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo:
  Polarização Horizontal: 43.061906 dB
  Polarização Vertical: 33.402781 dB
  Polarização Circular: 38.232343 dB
  Polarização Elíptica: 32.792704 dB

Probabilidade de Desvanecimento:
  Plano: 0.830308 %
  Seletivo: 0.005486 %

Atenuação Total do Enlace Prevista: 65.461372 dB

Potência do Sinal Recebido Previsto: -36.461372 dB

INDISPONIBILIDADE DO SISTEMA
Probabilidade de Disponibilidade devido atenuação da chuva para:
  Polarização Horizontal: 99.999997 %
  Polarização Vertical: 100.000000 %
  Polarização Circular: 100.000000 %
  Polarização Elíptica: 100.000000 %

Probabilidade de Disponibilidade devido ao desvanecimento plano: 99.999988 %

Probabilidade de Disponibilidade devido ao desvanecimento seletivo: 99.999698 %

Probabilidade total de ocorrência de SES: 0.000314 %

Tempo de interrupção do sistema no pior mês: 8.126193 s

Disponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano e Seletivo: 99.999906 %

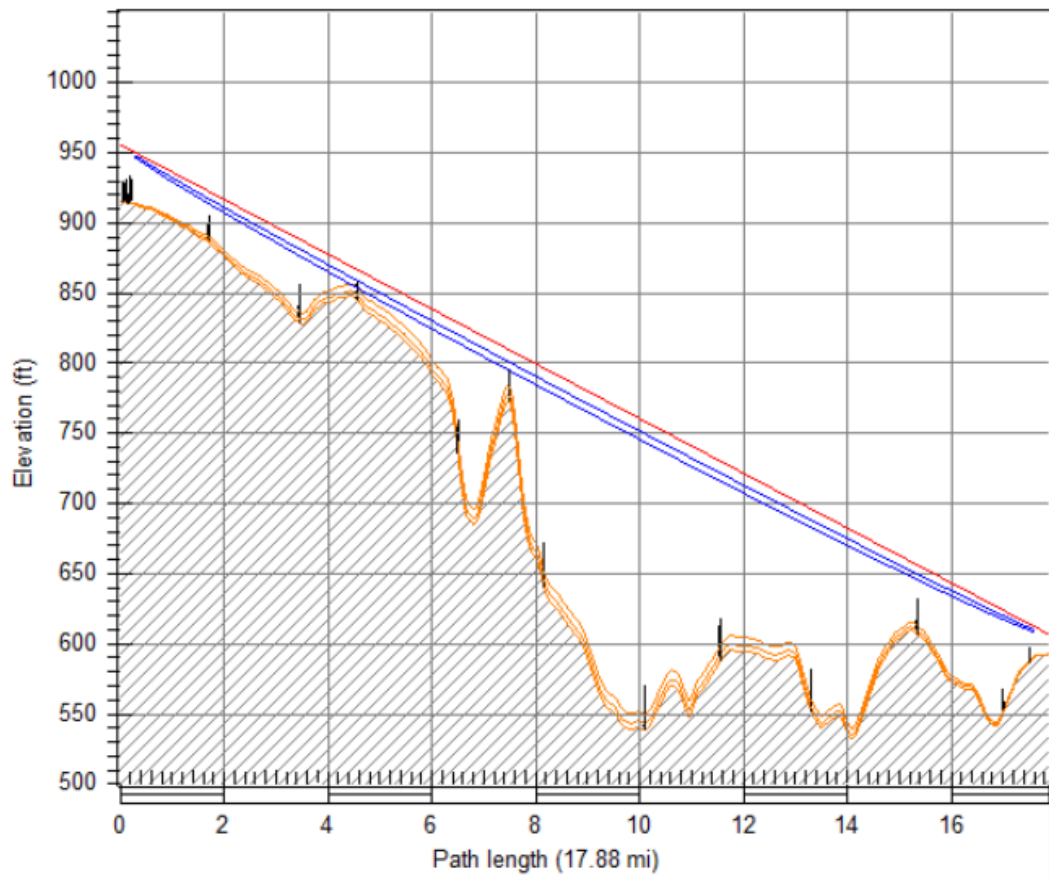
DISPONIBILIDADE TOTAL
  Polarização Horizontal: 99.999903 %
  Polarização Vertical: 99.999906 %
  Polarização Circular: 99.999906 %
  Polarização Elíptica: 99.999906 %

TEMPO DE INDISPONIBILIDADE NO ANO
  Polarização Horizontal: 0.507963 min
  Polarização Vertical: 0.495715 min
  Polarização Circular: 0.492029 min
  Polarização Elíptica: 0.496095 min

```

Fonte: o autor.

Figura 66 - Resultados simulados considerando parâmetros de equipamentos para estimativa de disponibilidade.



F = 6000.00 MHz K = 1.33, 0.55 %F1 = 100.0, 60.0, 60.0

	Munari	Agroporto
Latitude	18 32 27.90 S	18 25 44.70 S
Longitude	048 44 52.40 W	048 52 11.70 W
True azimuth (°)	313 52 07.59	133 54 26.87
Vertical angle (°)	001 10 05.96	001 02 51.32
Elevation (m)	914.77	592.70
Tower height (m)	48.00	30.00
Tower type	guyed	self supporting
Antenna model	P4-65D	P4-65D
Antenna gain (dBi)	34.00	34.00
Antenna gain (dBd)	34.15	34.15
Antenna height (m)	40.96	13.98
TX loss (dB)	0.00	0.00
RX loss (dB)	0.00	0.00
Diffraction loss (dB)		0.54
Radio model	PASOLINK+ L6G 155MB	PASOLINK+ L6G 155MB
TX power (dBm)	29.00	29.00
EIRP (dBm)	63.00	63.00
TX channel assignments	3h 6011.V	3I 5745.V
Receive signal (dBm)	-36.75	-36.75
Thermal fade margin (dB)	31.25	31.25
Annual 2 way multipath availability (%)		99.99999
Annual 2 way multipath unavailability (sec)		4.17
Annual rain availability (%)		100.00000
Annual rain + multipath availability (%)		99.99999

Fonte: o autor.

3.6.3 Discussão dos Resultados

Comparando os resultados obtidos através do código implementado pelo autor (Figuras 66 e 68) com os gerados pela ferramenta avançada de simulação (Figuras 67 e 69), percebe-se uma margem de erro bem pequena, menor do que 1 dB no sinal recebido, refletindo um alto grau de precisão no projeto teórico.

Utilizando um valor médio entre a potência do sinal recebido simulado e o calculado com base na teoria, tem-se para o primeiro enlace do *backbone* -48,45 dBm e para o segundo -36,61 dBm. Assim, o equipamento de rádio em operação atualmente airFiber 5XHD – descrito no Capítulo 4 desta monografia – conseguiria entregar a maior capacidade de transferência de dados para esse limiar de recepção utilizando a modulação 1024-QAM, a uma largura de banda de 100 MHz para o enlace de maior distância, e com a modulação 4096-QAM para o de menor, o qual o requisito para este último caso é um limiar de -39 dBm, isso considerando uma margem de segurança de aproximadamente 3 dB para oscilações do sinal.

Este é um equipamento de alto desempenho que já fornece uma capacidade acima do que a empresa em questão necessita. Dito isso, teoricamente o enlace, seguindo essas condições de altura da antena e características dos equipamentos utilizados no projeto teórico, estaria dimensionado acima do necessário, sendo passível de novas simulações com equipamentos de menores custos visando um orçamento mais atrativo, porém ao mesmo tempo a empresa poderia também manter essas características caso venha a ter expansões num futuro breve, as quais demandariam mais capacidade de tráfego do enlace, utilizando todo o potencial que ele teria a fornecer.

3.7 COMPOSIÇÃO DOS SISTEMAS DE RADIOVISIBILIDADE

Antes de avançar para o próximo capítulo, são definidos alguns conceitos importantes em relação aos elementos que compõem um sistema de radiovisibilidade como os tipos de torres, antenas, rádios, sistema de energia e aterramento, dentre outros.

3.7.1 Sistema Aéreo

O sistema aéreo é composto de antena, cabeamento, conectores, sistema de pressurização, torres, suportes de antenas e sistema de aterramento.

3.7.1.1 Antenas

A antena é um transdutor de energia elétrica para eletromagnética ou vice-versa, sendo capaz de receber e transmitir ondas eletromagnéticas. As principais características que definem este equipamento são (10):

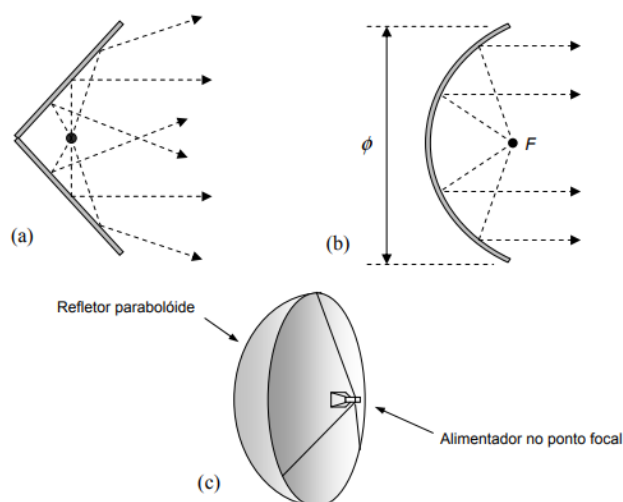
- **Bandwidth (Largura de Banda):** é o intervalo de frequências no qual a antena opera satisfatoriamente, mantendo todas as características elétricas dentro do especificado;
- **Ganho da Antena:** medida em dBi que representa a relação entre a energia irradiada na direção do máximo do diagrama de radiação e a que seria irradiada por uma antena isotrópica - modelo ideal que irradia igualmente em todas as direções - ou seja, o quanto ela é mais diretiva do que a isotrópica;
- **Polarização:** está relacionada com a direção do campo elétrico. É definida pelas características mecânicas da antena e do posicionamento do alimentador da mesma;
- **Discriminação da Polarização Cruzada (XPD):** é a isolação do sinal de uma polarização em relação a outra, na mesma antena;
- **Diagrama de Radiação:** é um gráfico que mostra as características da antena no que se refere à potência irradiada em função do ângulo. As características principais deste parâmetro são os lóbulos principal e secundários e o ângulo de meia potência (ângulo onde o sinal tem queda de 3 dB com relação ao ângulo de irradiação máxima), sendo que quanto menor esse ângulo, mais diretiva será a antena, consequentemente mais imune a interferências.

Os sistemas de micro-ondas em visibilidade empregam antenas muito diretivas para concentrar a potência transmitida num feixe muito estreito. Esta alta diretividade é alcançada com a utilização de antenas parabólicas, apresentadas na Figura 70, cujas características eletromagnéticas são determinadas pela regularidade da superfície do refletor e pela qualidade do projeto do alimentador (10).

As antenas parabólicas são constituídas de um elemento irradiador básico, ligado ao sistema de alimentação e um refletor (10):

- **Refletores:** consiste num parabolóide de revolução, sendo que o irradiador básico se localiza no foco do parabolóide. As dimensões do refletor, definidas pelo diâmetro da abertura e pela distância focal, determinam as características da antena;
- **Alimentadores:** elementos ativos (irradiantes) das antenas parabólicas;
- **Radomes ou blindagens:** estruturas adicionais utilizadas nas antenas de alto e de ultra alto desempenho, um exemplo pode ser visto na Figura 71. Podem ser flexíveis (melhoram a diretividade e dão proteção extra contra a carga de vento, e é composta por uma blindagem/saia com a parte interna preenchida por absorvedores que absorvem as interferências, além de uma capa de proteção que evita ninhos de passarinhos, acúmulo de água e deterioração) ou *molded* (serve para impedir o acúmulo de água e neve na antena).

Figura 67 - (a) Dipolo com refletor de canto; (b) Geometria da antena parabólica e (c) antena parabólica com alimentação no ponto focal.



Fonte: extraído de (33).

Figura 68 - Antena parabólica alimentada pelo ponto focal com blindagem e radome.



Fonte: extraído de (33).

3.7.1.2 Ganho da Antena e Diagrama de radiação

Na determinação do ganho, a antena direcional é comparada à antena isotrópica, que serve como linha de base e, como tal, possui ganho de 0 dBi. O ganho da antena direcional fornece uma medida em dBi de quanto a intensidade do sinal da antena direcional excede a da antena isotrópica. Essa quantidade é determinada comparando as intensidades eletromagnéticas (ou de potência), medidas em microwatts por metro quadrado ou alguma variação de potência, das antenas direcionais e isotrópicas a uma determinada distância (35).

A Equação 3.1 pode ser usada para calcular o ganho de uma antena (35):

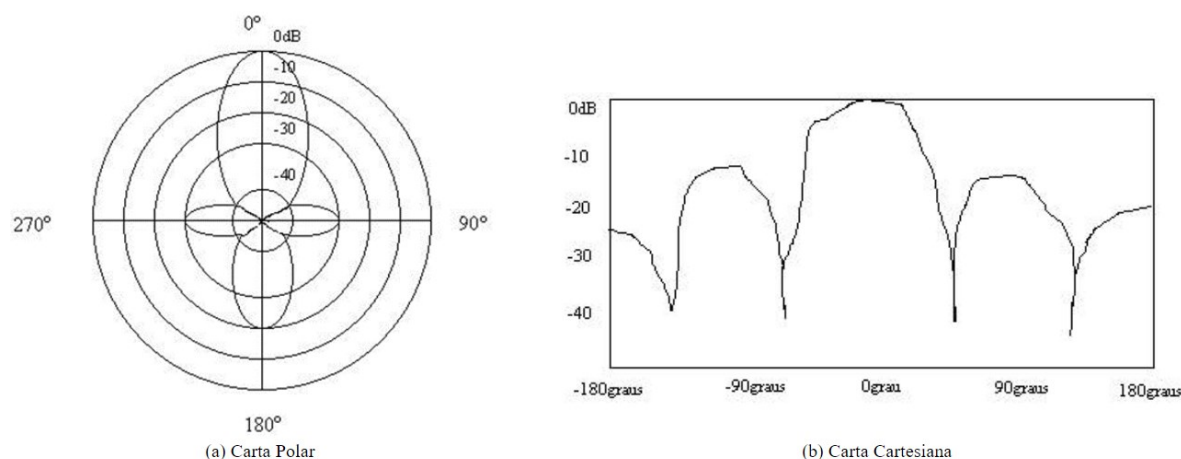
$$G = 10 \log \left(\frac{P_0}{P_a} \right) \quad (3.1)$$

Em que:

- P_0 - potência necessária na entrada de uma antena de referência sem perdas;
- P_a - potência fornecida na entrada da antena específica.

O diagrama de radiação representa graficamente o comportamento da antena quanto a sua irradiação. Apesar da irradiação ser tridimensional, o diagrama é comumente encontrado nos planos horizontal e vertical e pode ser apresentado na forma de carta polar ou cartesiana, como mostra a Figuras 72.

Figura 69 - Diagrama de radiação de uma antena representado por carta polar e cartesiana.



Fonte: extraído de (36).

No ângulo de 0 graus a potência irradiada é máxima, fornecida pelo datasheet do equipamento, diminuindo seu valor de acordo com a mudança do ângulo.

3.7.1.3 Cabos de Par Trançado e Pigtails

O Cabo por par trançado (*Twisted Pair*) é um tipo de cabo que possui pares de fios entrelaçados um ao redor do outro para cancelar as interferências eletromagnéticas (37).

As normas ANATEL definem as blindagens possíveis de acordo com a ISO/IEC 11801, usando as siglas abaixo (37):

- **U (*Unshielded*):** Sem blindagem;
- **F (*Foil*):** Fita plástica aluminizada;
- **S (*Screened*):** Malha de fios metálicos (cobre, alumínio, etc), outro tipo de blindagem.

A blindagem pode ser global (envolvendo todos os pares) ou individual (par a par). Na Tabela 12 é apresentada as características de cada categoria do cabo de par trançado em termos de sua capacidade, na sequência a Figura 73 mostra a estrutura com e sem blindagem.

Tabela 12 – Padronização dos cabos UTP segundo norma EIA/TIA-568-B.

	Largura de Banda (MHz)	Velocidade	Distância Garantida (m)
CAT 3	1	10 Mbps	100
CAT 5	100	100 Mbps	100
CAT 5e	125	1 Gbps	100
CAT 6	250	1 Gbps	100
CAT 6a	500	10 Gbps	55
CAT 7	600	10 Gbps	100
CAT 7a	1000	100 Gbps	15
CAT 8	2000	40 Gbps	30

Fonte: o autor.

Figura 70 - Estrutura física dos cabos de pares trançados.



Fonte: extraído de (38).

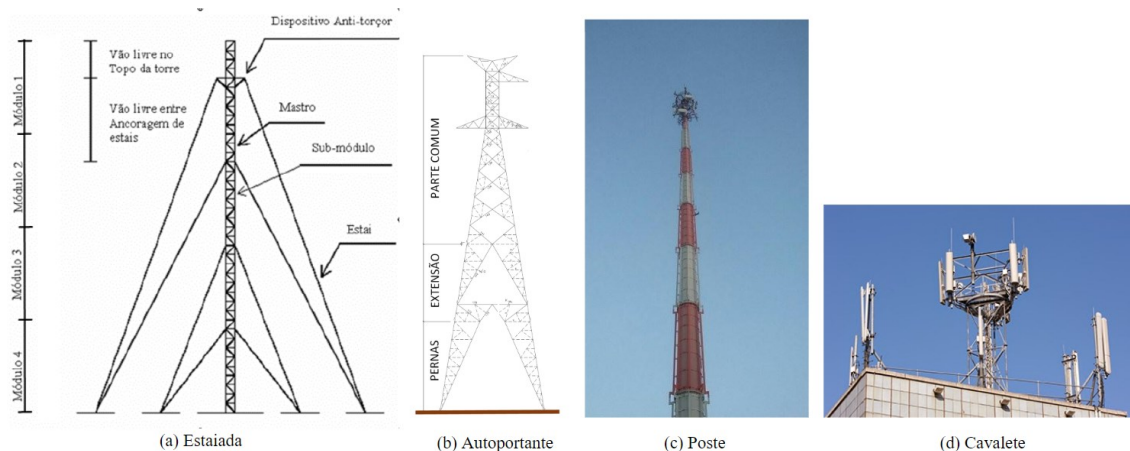
Enquanto os cabos de pares trançados são utilizados nos enlaces de micro-ondas para conectar os dispositivos de rede ao rádio, como roteadores ou *switches*, a conexão entre a antena e o equipamento RF, quando este é acoplado atrás da mesma, é feito através de pequenos cabos conectorizados em suas extremidades, os quais são chamados de *Pigtails*.

3.7.1.4 Torres

Apresentadas na Figura 74, as torres são classificadas de acordo com sua estrutura como (10):

- **Autoportante:** projetadas para suportar grande quantidade de antenas com alturas de até 120 m ou mais. Devido a sua estrutura maior comparada aos outros tipos de torre, seu custo é mais elevado, mas tem como vantagem ocupar menos espaço no terreno por dispensar estaios, além de possuir capacidade de carga bem maior, facilidades no içamento e instalação de antenas e guias de onda;
- **Estaiada:** são mais econômicas, mas apresentam a desvantagem de necessitar de um espaço maior para os estaios. Mais utilizadas em estações com pequena quantidade de direções, pois sua capacidade de carga é menor;
- **Postes:** utilizados nos casos em que a altura necessária não é muito grande (40 m ou menos) e a quantidade de antenas também é pequena;
- **Cavaletes:** pequenas estruturas construídas para suportar antenas a um nível pouco acima do solo ou topo de um prédio.

Figura 71 - Tipos de Torres.



Fonte: o autor com imagens obtidas no google imagens.

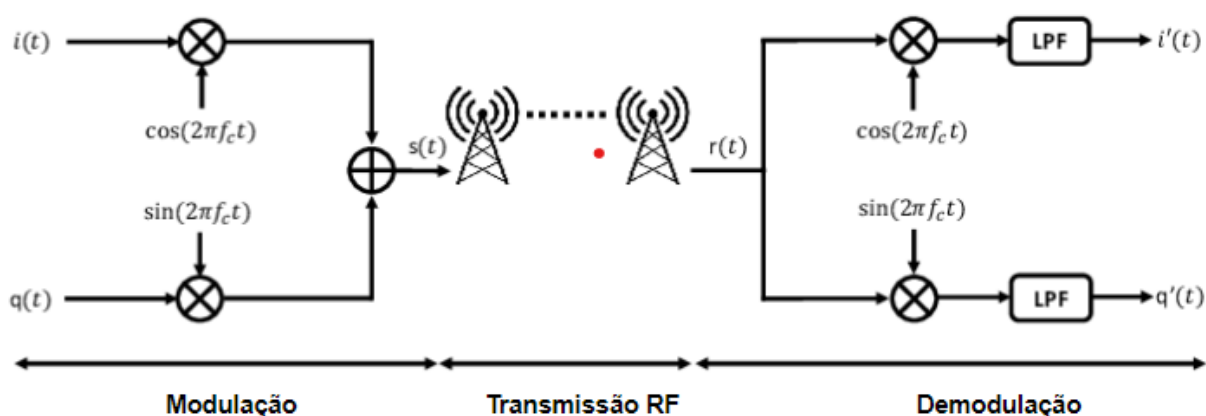
As torres de comunicações, para maior segurança, também são compostas pelos seguintes acessórios:

- **Dispositivos de Proteção Contra Descargas Atmosféricas:** mais conhecidos como para-raios, são instalados no topo das torres para proteger a estrutura e os equipamentos de danos causados por raio. Eles funcionam direcionando a energia das descargas atmosféricas para o solo;
- **Aterramento:** consiste em uma rede de fios ou hastes enterradas no solo, projetada para dissipar correntes elétricas indesejadas que possam surgir devido a descargas atmosféricas ou outros eventos. Um sistema de aterramento adequado evita choques elétricos e minimiza riscos;
- **Plataforma de Trabalho:** permite que técnicos e engenheiros acessem a torre com segurança durante a instalação ou manutenção de equipamentos;
- **Escada com Guarda-Corpo:** As escadas instaladas nas torres de comunicação permitem o acesso vertical a diferentes níveis da torre. O guarda-corpo é uma barreira de segurança que é anexada à escada para evitar quedas acidentais;
- **Balizamento:** envolve a instalação de luzes e sinais luminosos para garantir a visibilidade da torre, especialmente durante a noite. Esses sistemas de iluminação são usados para sinalizar a presença da torre a aeronaves e evitar colisões. O tipo e a intensidade das luzes de balizamento são regulamentados e variam dependendo da altura e da localização da torre.

3.7.2 Rádio Digital

A principal característica do rádio digital é a transmissão de informações ou sinais modulantes digitais, as etapas na execução desta tarefa são resumidas pela Figura 75. Na primeira etapa desta transmissão é feita a modulação digital, processo esse que consiste na geração de uma portadora senoidal, em Frequência Intermediária (FI), normalmente na faixa de dezenas ou centenas de MHz. Essa portadora é modulada com o sinal modulante digital, os quais são descritos na seção 3.7.2.1 (10).

Figura 72 - Etapas de uma transmissão digital.



Fonte: extraído de (10).

3.7.2.1 Modulação e Demodulação

A modulação constitui-se na técnica empregada para modificar um sinal com a finalidade de possibilitar o transporte de informações pelo canal de comunicação e recuperar o sinal, na sua forma original, na outra extremidade.

Há dois principais fatores a serem considerados na escolha da técnica de modulação: eficiência espectral e sensibilidade a ruídos, distorções e interferências. A eficiência espectral refere-se a quão bem os dados podem ser transmitidos em um determinado espectro de frequência (medida em bits/s/Hz), enquanto sensibilidade a ruídos se relaciona a quão

resistentes os dados são a fatores que podem distorcê-los e é medida pela relação portadora/ruído (*carrier/noise* – C/N) (10).

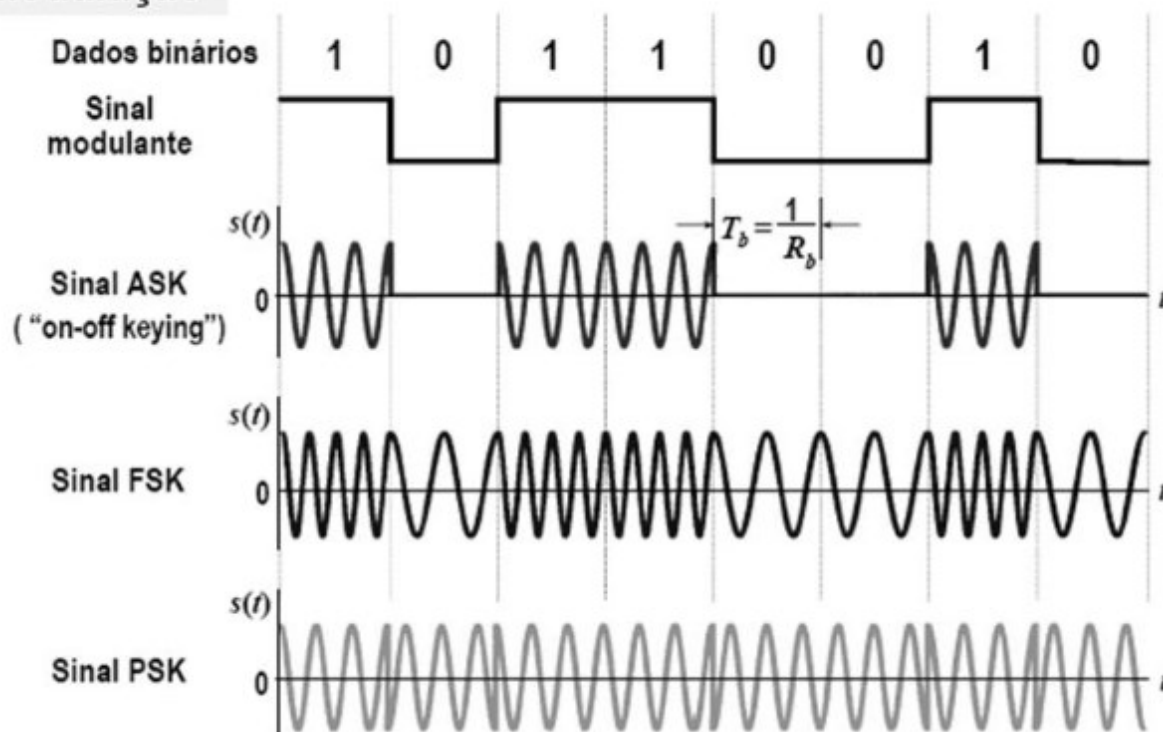
Técnicas de modulação mais básicas são menos sensíveis a problemas, como ruídos, mas usam mais largura de banda para transmitir a mesma quantidade de informações. Técnicas de modulação mais complexas, como aquelas que usam múltiplos níveis de sinais, são mais eficientes em termos de largura de banda, mas podem ser mais suscetíveis a ruídos e interferências. Para combater esses problemas, são necessárias medidas adicionais, como códigos corretores de erros e equalizadores (10).

3.7.2.2 Modulações em Amplitude, Frequência e Fase

Na modulação por chaveamento de amplitude (ASK – *Amplitude Shift Keying*) a amplitude da onda é alterada de acordo com a variação do sinal de informação, por exemplo, um valor alto de amplitude pode representar um bit “1” e um valor baixo um bit “0”. Seguindo a mesma lógica, na modulação por chaveamento de frequência (FSK – *Frequency Shift Keying*) são utilizados dois valores de frequência para descrever cada nível de bit e por fim, na modulação por chaveamento de fase (PSK – *Phase Shift Keying*), é a variação de fase da onda que representará o bit. A representação senoidal dessas modulações pode ser vista na Figura 76 (10).

Figura 73 - Tipos de modulação.

Modulação



Fonte: extraído de (39).

3.7.2.3 QPSK e QAM

Na modulação PSK a transmissão de uma informação por canal é chamada de 2-PSK ou BPSK (B é abreviatura de *Binary*), podendo apenas representar o bit “1” ou “0”, sinalizando esta diferença por uma defasagem de 180 graus da onda, como é visto na Figura 76. Esse tipo de modulação é bastante ineficiente em termos de quantidade de bits transmitidos por largura de banda, utilizam-se normalmente modulações PSK multiníveis para reduzir esta ineficiência (10).

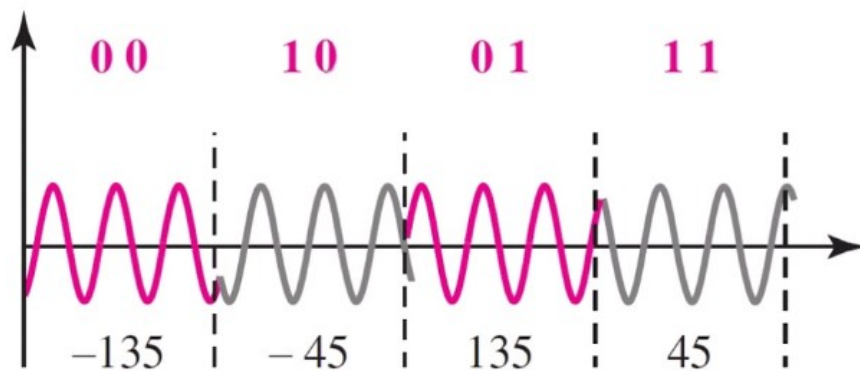
O termo quadratura nas modulações significa que as componentes senoidais estão defasadas em 90 graus. A modulação QPSK (Q é a abreviatura de *Quadrature*) é capaz de transmitir 2 bits por símbolo, como pode ser verificado na Figura 77, alcançando uma taxa de dados (*Data Rate*) maior. Uma transmissão com modulação 8-PSK poderia ser utilizada, entretanto, a sensibilidade a ruídos e distorções aumenta, de forma que o desempenho do

sistema fica comprometido. Para contornar esse problema e tornar possível a transmissão de mais informações por canal utiliza-se a modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Na modulação QAM as características de fase e amplitude variam em função dos trens de bits de informação. Para atingir boa eficiência espectral utilizam-se modulações multiníveis de no mínimo 16 estados, correspondente a 4 bits (16QAM) (10).

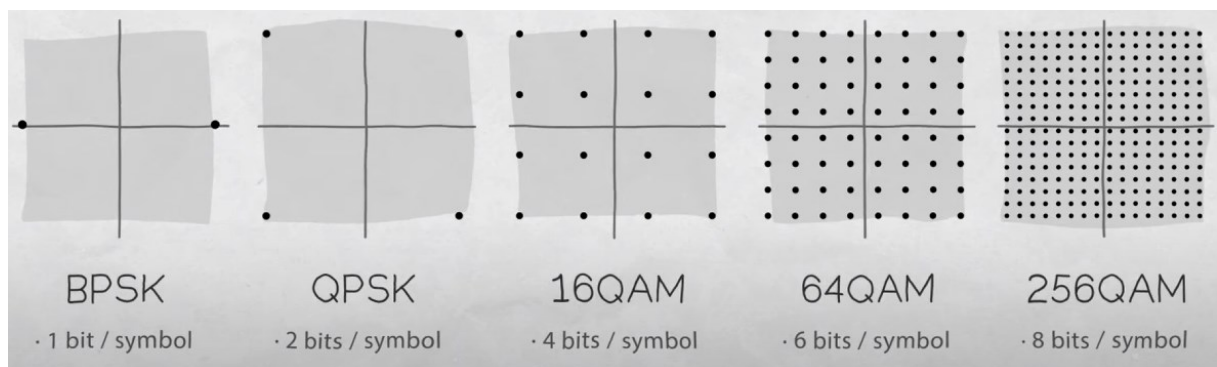
O diagrama que mostra as amplitudes e fases do sinal de um esquema de modulação digital é chamado de Constelação, como mostra a Figura 78.

Figura 74 - Modulação QPSK.



Fonte: extraído de (40).

Figura 75 - Diagrama de Constelação para diferentes níveis.

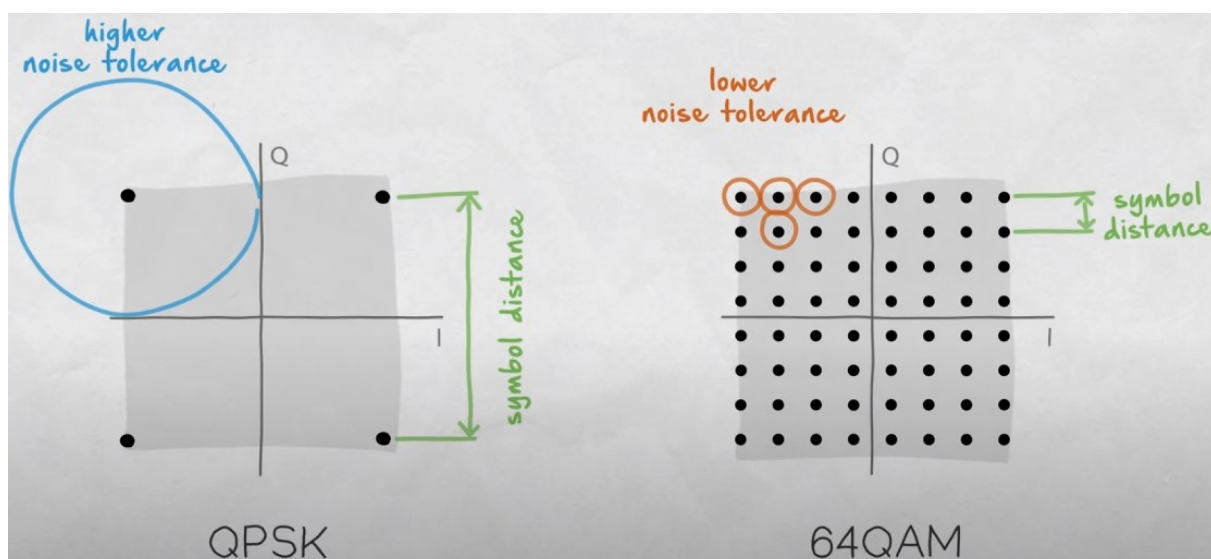


Fonte: extraído de (41).

A Figura 79 é apenas uma representação didática da diferença de tolerância a ruídos entre uma modulação menos e mais complexa, onde o eixo “I” refere-se a amplitude da onda em cada símbolo e o eixo “Q” a fase. Quanto maior o nível da modulação mais próximos os símbolos estarão um do outro e por este motivo a sensibilidade aos ruídos é maior, já que fica

mais fácil de o equipamento interpretar um símbolo errôneo. Para contornar este problema são aplicados os códigos corretores de erros.

Figura 76 - Exemplificação da tolerância a ruídos.



Fonte: extraído de (41).

3.7.2.4 Arquiteturas de Múltiplo Acesso

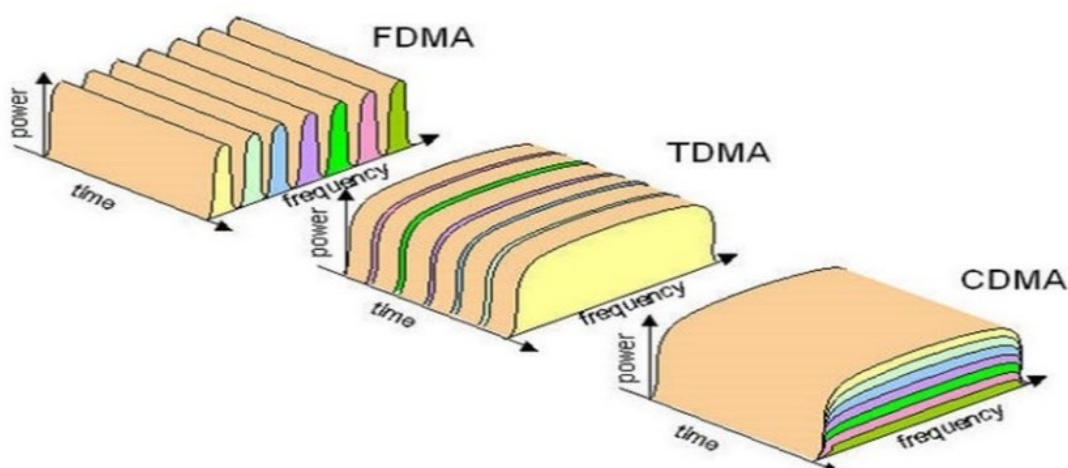
O compartilhamento de recursos em redes de comunicações constitui uma maneira eficiente de atingir alta capacidade. Relativamente aos sistemas rádio, os recursos são os canais de rádio (faixa de frequência disponível) (10).

As três principais arquiteturas de múltiplo acesso, apresentadas pela Figura 80, são (10):

- **FDMA (*Frequency Division Multiple Access*):** nesta técnica, a banda de frequência total é dividida em canais de frequência mais estreitos, e cada usuário ou estação é alocado a um canal específico;
- **TDMA (*Time Division Multiple Access*):** uma mesma portadora pode ser compartilhada por diferentes canais, fazendo uso dessa portadora em diferentes instantes de tempo;

- **CDMA (*Code Division Multiple Access*):** aqui cada estação usa um código específico para modular seus dados. Todos os usuários compartilham a mesma banda de frequência, mas os códigos únicos permitem que as estações transmitam simultaneamente sem interferir umas com as outras.

Figura 77 - Arquiteturas de Múltiplo Acesso.



Fonte: extraído de (10).

3.7.2.5 Tabela MCS

Uma Tabela MCS (*Modulation and Coding Scheme*) é uma ferramenta usada em sistemas de comunicação, especialmente em redes sem fio, para descrever diferentes esquemas de modulação e codificação disponíveis para transmitir dados. Essas tabelas desempenham um papel fundamental na otimização do desempenho de redes sem fio em ambientes variáveis. São utilizadas para adaptar a modulação e a taxa de codificação com base nas condições da rede, qualidade do sinal e requisitos de desempenho (42)].

Os valores de *Data Rate* em Mbps para diferentes parâmetros do sistema (Figura 81) é expresso pela Equação 3.2 (42):

$$Data\ Rate = \frac{N_{SD} \cdot N_{BPSCS} \cdot R \cdot N_{SS}}{T_{DFT} + T_{GI}} \quad (3.2)$$

Em que:

- N_{SD} (*Number of Data Subcarriers*) – é a quantidade de subportadoras utilizadas para transmitir os dados;
- N_{BPSCS} (*Number of Coded Bits per Subcarrier per Stream*) – é a quantidade de bits por símbolo, o qual depende da técnica de modulação utilizada;
- R (*Coding*) – é a taxa de bits de redundância adicionados para corrigir erros de transmissão;
- N_{SS} (*Number of Spatial Streams*) – representa a quantidade de antenas utilizadas para transmitir o dado;
- T_{DFT} (*OFDM Symbol Duration*) - é o tempo que um símbolo OFDM leva para ser transmitido;
- T_{GI} (*Guard Interval Duration*) - é um curto período de tempo entre os símbolos OFDM adjacentes, que ajuda a minimizar a interferência entre eles devido ao fenômeno de dispersão temporal.

Figura 78 - Parâmetros dos padrões 802.11n e 802.11ac para cálculo da taxa de dados.

PHY	Modulation		R	N_{SS}	N_{SD}				T_{DFT}	T_{GI}	
	Name	N_{BPSCS}			20MHz	40MHz	80MHz	160MHz		Long	Short
802.11n (HT)	BPSK	1	1/2	1 to 4	52	108	234	468	3.2 μ s	0.8 μ s	0.4 μ s
	QPSK	2	1/2 & 3/4								
	16-QAM	4	1/2 & 3/4								
	64-QAM	6	1/2 & 2/3 & 3/4								
802.11ac (VHT)	BPSK	1	1/2	1 to 8	52	108	234	468	3.2 μ s	0.8 μ s	0.4 μ s
	QPSK	2	1/2 & 3/4								
	16-QAM	4	1/2 & 3/4								
	64-QAM	6	1/2 & 2/3 & 3/4								
	256-QAM	8	2/3 & 5/6								

Fonte: extraído de (42).

Os equipamentos de rádio normalmente trazem no *Datasheet* os índices MCS, cujas características podem ser consultadas na tabela MCS disponível em (42).

3.7.2.6 Blocos Funcionais dos Equipamentos de Rádio

Os equipamentos de rádio são compostos por diversos blocos funcionais que trabalham em conjunto para assegurar a transmissão eficiente e confiável de informações. Um desses blocos é o Sistema de Comutação Automática, que tem a responsabilidade de proteger o tráfego de dados contra falhas nos equipamentos e problemas na propagação do sinal, garantindo que a comunicação permaneça robusta e ininterrupta (10).

O Processamento Digital, ou Banda Básica, desempenha um papel fundamental no tratamento dos sinais. No lado da transmissão, ele lida com tarefas como equalização do sinal, recuperação do relógio, conversão do sinal bipolar em unipolar, sincronização e inserção dos bits de overhead, entre outras. No lado da recepção, suas funções incluem a extração do código corretor de erros (FEC), desembaralhamento do sinal, extração dos bits de overhead e dessincronização. É um componente crítico para assegurar que os dados transmitidos sejam recuperados de maneira confiável na estação receptora (10).

O Modem (Modulador-Demodulador) é responsável por aplicar a modulação ao sinal a ser transmitido, convertendo-o em um formato adequado para a transmissão de rádio. A escolha do tipo de modulação, seja ela amplitude, frequência ou fase, é feita com base em diversos fatores, incluindo a capacidade de transmissão, a largura de banda disponível e os requisitos de desempenho de acordo com o plano de canalização RF definido pela Anatel (10).

Os Transmissores e Receptores (Transceptores) têm funções distintas e complementares. O transmissor converte o sinal modulado em frequência intermediária em um sinal de radiofrequência e amplifica-o a um nível apropriado para ser transmitido via antena. O receptor, por outro lado, amplifica o sinal recebido da antena na frequência de radiofrequência e o converte de volta para frequência intermediária. É importante destacar que a distorção do sinal é minimizada através de técnicas como o "*back-off*", que envolve a redução do nível de saída do amplificador de potência em relação ao nível de saturação (10).

Finalmente, o Circuito de Ramificação (*Branching*) é usado para acoplar e desacoplar os diferentes sinais no sentido de transmissão e recepção, evitando interferências mútuas. Esse componente consiste tipicamente em dispositivos como duplexadores, filtros de canal, circuladores, isoladores e circuitos de guia de onda ou cabos coaxiais (10).

Nos rádios utilizando altas frequências (superiores a 15GHz), a parte correspondente a RF e FI, ou seja, o transceptor, é acomodada na torre, junto à antena, sendo conhecida como unidade ODU (*Outdoor Unit*), e a parte correspondente ao processamento digital e modem fica acomodada na sala de equipamentos, correspondendo a unidade IDU (*Indoor Unit*) (10).

Para aumentar a confiabilidade do sistema é projetado diferentes configurações de proteção como diversidade de espaço ou frequência, como será visto a seguir.

3.7.2.7 Configuração dos Sistemas de Proteção RF

A ideia da aplicação de técnicas de proteção é conseguir a melhor relação custo/benefício. É necessário prover um sistema de proteção adequado para garantir um grau de confiabilidade requerida para prevenção tanto contra falha de equipamentos como para fenômenos de propagação.

Os sistemas de proteção podem ser do tipo (10):

- **(1 + 0):** nesse sistema, temos um único transmissor principal e nenhuma redundância. Se ocorrer uma falha no transmissor principal, a comunicação será interrompida;
- **Hot Standby:** nesse cenário, há um transmissor principal e um transmissor de reserva. O transmissor de reserva está ocioso, pronto para entrar em operação se o transmissor principal falhar. Isso fornece alguma redundância, mas o tempo de comutação pode causar uma breve interrupção na comunicação;
- **Hot Standby com Diversidade de Espaço:** melhora a redundância do sistema *Hot Standby*. Os transmissores principais e de reserva estão localizados a uma distância significativa um do outro, o que reduz a probabilidade de ambos falharem simultaneamente devido a eventos ambientais, como tempestades;
- **Twin Path:** nesse sistema, existem dois transmissores principais funcionando simultaneamente. Isso não apenas fornece redundância, mas também permite o balanceamento de carga entre os dois caminhos, melhorando a capacidade e a confiabilidade;

- ***Twin Path* com Diversidade de Espaço:** além da duplicação dos caminhos de transmissão, esse sistema incorpora a diversidade de espaço. Os transmissores principais estão localizados a uma distância considerável, reduzindo a probabilidade de falhas simultâneas;
- **(n + 1):** esse sistema envolve múltiplos transmissores principais e um transmissor de reserva. Se um dos transmissores principais falhar, outro pode assumir. A redundância é escalável, dependendo do valor de 'n';
- **(n + 1) com Diversidade de Espaço:** este é uma versão avançada do sistema (n + 1) com a adição de diversidade de espaço entre os transmissores principais. Isso melhora ainda mais a robustez do sistema.

Para finalizar o assunto sobre os rádios, na seção 3.7.2.8 são apresentados os parâmetros sistêmicos do equipamento.

3.7.2.8 Parâmetros Sistêmicos

Os parâmetros sistêmicos dos rádios são fornecidos pelos fabricantes em valores típicos (médios) e garantidos – nos projetos sistêmicos são utilizados, normalmente, os valores típicos da maioria dos parâmetros. Os principais parâmetros são descritos abaixo (10):

- **Potência de Transmissão (W, mW, dBm):** especificada na saída do amplificador de potência. Considera o valor de *back off*, e não a potência de saturação;
- **Perda do Branching (dB):** depende da configuração sistêmica. Configurações (1 + 0) e (1 + 1) *Twin Path* apresentam perdas menores do que na configuração *Hot Standby*. Na configuração (n + 1), à medida que aumenta a quantidade de transmissores, a perda cresce, devido ao aumento da quantidade de circuladores e cabos ou guias de conexão;
- **Taxa Bruta de Transmissão (MHz):** é a taxa total de transmissão, considerando todos os *Overheads* (informações adicionais e necessárias que são inseridas ou incluídas durante a transmissão de dados ou comunicação)

introduzidos pelos equipamentos, como os canais de serviços, *way-side*, FEC (*Forward Error Correction*);

- **Largura de Faixa de Transmissão (MHz):** a largura de faixa de Nyquist é utilizada nos projetos sistêmicos. É obtida por meio da divisão da taxa bruta de transmissão pelo nível de modulação;
- **Figura de Ruído do Receptor (dB):** determina o nível do ruído térmico (ruído eletrônico que ocorre devido à agitação térmica dos portadores de carga dentro de um condutor ou componente eletrônico) e o consequente nível de recepção para uma determinada BER, em função do valor do C/N para esta taxa;
- **Nível de Recepção para um Determinada BER (dB):** depende da qualidade do equipamento e do tipo de modem utilizado;
- **Valor de Sistema (dB):** mede a qualidade do equipamento rádio como um todo. O valor bruto de sistema corresponde à diferença entre a potência de transmissão e o nível de recepção para uma dada BER. O parâmetro mais importante é o seu valor líquido, que leva em conta a perda do *branching*;
- **Curvas de Assinatura:** descreve maior ou menor imunidade aos fenômenos de desvanecimento seletivo. A probabilidade de interrupção devido a fading é proporcional a área da curva de assinatura. O cálculo baseia-se na largura de faixa da assinatura (MHz) e profundidade da assinatura (dB);
- **Fator de Rejeição de Interferência (IRF – *Interference Rejection Factor*):** utilizado no cálculo de interferências, depende dos seguintes parâmetros – separação das frequências, espectro do sinal recebido, espectro do sinal interferente e cadeia de filtragem do receptor;
- **Ganho do XPIC (*Cross-Polarization Interference Canceller*) (dB):** indica a eficiência do cancelador de interferência de polarização cruzada utilizada no reuso de frequências, deve ser de no mínimo 20 dB.

3.7.3 Variação da Frequência de Transmissão

Na Figura 82, são apresentados os resultados para o enlace Fomus até Munari, simulado no Pathloss, mantendo as características mencionadas anteriormente e variando apenas o valor de frequência.

Figura 79 - Simulação do enlace variando o valor da frequência.

f = 3.0 GHz			f = 6.0 GHz			f = 15.0 GHz		
EIRP (dBm)	63.00	63.00	EIRP (dBm)	63.00	63.00	EIRP (dBm)	63.00	63.00
Free space loss (dB)		138.31	Free space loss (dB)		144.33	Free space loss (dB)		152.29
Atmospheric absorption loss (dB)		0.43	Atmospheric absorption loss (dB)		0.56	Atmospheric absorption loss (dB)		1.84
Net path loss (dB)	71.59	71.59	Net path loss (dB)	77.74	77.74	Net path loss (dB)	86.98	86.98
Receive signal (dBm)	-42.59	-42.59	Receive signal (dBm)	-48.74	-48.74	Receive signal (dBm)	-57.98	-57.98
Thermal fade margin (dB)	25.41	25.41	Thermal fade margin (dB)	19.26	19.26	Thermal fade margin (dB)	10.02	10.02
Worst month multipath availability (%)	99.95117	99.95117	Worst month multipath availability (%)	99.79060	99.79060	Worst month multipath availability (%)	97.97930	97.97930
Worst month multipath unavailability (sec)	1283.30	1283.30	Worst month multipath unavailability (sec)	5502.96	5502.96	Worst month multipath unavailability (sec)	53103.89	53103.89
Annual multipath availability (%)	99.98127	99.98127	Annual multipath availability (%)	99.91968	99.91968	Annual multipath availability (%)	99.22486	99.22486
Annual multipath unavailability (sec)	5907.27	5907.27	Annual multipath unavailability (sec)	25331.14	25331.14	Annual multipath unavailability (sec)	244447.18	244447.18
Annual 2 way multipath availability (%)		99.96254	Annual 2 way multipath availability (%)		99.83935	Annual 2 way multipath availability (%)		98.44973
Annual 2 way multipath unavailability (sec)		11814.54	Annual 2 way multipath unavailability (sec)		50662.29	Annual 2 way multipath unavailability (sec)		488894.37
Polarization		Vertical	Polarization		Vertical	Polarization		Vertical
0.01% rain rate (mm/hr)		100.00	0.01% rain rate (mm/hr)		100.00	0.01% rain rate (mm/hr)		100.00
Flat fade margin - rain (dB)		25.41	Flat fade margin - rain (dB)		19.26	Flat fade margin - rain (dB)		10.02
Rain attenuation (dB)			Rain attenuation (dB)		19.26	Rain attenuation (dB)		10.02
Annual rain availability (%)		100.00000	Annual rain availability (%)		100.00000	Annual rain availability (%)		99.80104
Annual rain unavailability (min)		0.00	Annual rain unavailability (min)		0.00	Annual rain unavailability (min)		1045.75
Annual rain + multipath availability (%)		99.96254	Annual rain + multipath availability (%)		99.83935	Annual rain + multipath availability (%)		98.25076
Annual rain + multipath unavailability (min)		196.91	Annual rain + multipath unavailability (min)		844.37	Annual rain + multipath unavailability (min)		9193.99

Fonte: o autor.

O uso de frequência mais alta neste enlace resulta em uma atenuação maior, onde os efeitos são bastante consideráveis, como pode ser visto no tempo anual total de indisponibilidade, o qual na frequência de 3 GHz foi um tempo bem baixo quando comparado aos 9 mil minutos usando a frequência de 15 GHz. A potência recebida também tem uma variação considerável, e será visto que ela é uma medida importante em relação a capacidade de transmissão de dados que o enlace conseguirá entregar.

No Capítulo 4 são detalhados todos os equipamentos em operação atualmente nos enlaces analisados e, no Capítulo 5, são discutidos os resultados teóricos comparados com os reais, observados pela interface dos equipamentos, além de testes em campo da velocidade de acesso da rede, eficiência dos servidores, sistemas de segurança e telemetria na operação agrícola.

4. MATERIAIS E METODOS

Este capítulo oferece uma visão abrangente dos materiais utilizados, das metodologias aplicadas e das fontes de dados coletados durante o desenvolvimento deste trabalho. É apresentada uma descrição detalhada dos materiais, ferramentas e recursos que viabilizaram a condução deste estudo, incluindo fotografias de campo dos equipamentos, datasheets dos dispositivos, descrições das instalações, entre outros elementos essenciais. O autor recomenda a consulta do diagrama de rede do Apêndice E para melhor visualização da estrutura apresentada aqui.

4.1 ESCRITÓRIOS DAS FILIAIS FOMUS E AGROPORTO E SEUS CPD

A filial Fomus em Uberlândia possui mais de 30 funcionários em atividade nos dias úteis em horário comercial, o escritório é dividido em blocos, cada um responsável por um setor da empresa, como mostra a Figura 83.

Figura 80 - Filial Fomus na cidade de Uberlândia.



Fonte: o autor *in loco*.

Como apresentado pelo diagrama de rede o escritório possui vários equipamentos de tecnologia como pontos de acesso Ubiquiti para comunicação Wi-Fi com os dispositivos, telefones IP Cisco para operação com o servidor privado dedicado PBX, notebook's, impressoras e etc.

No andar existe um ambiente com temperatura controlada dedicado aos servidores e serviços de tecnologia, importantes para gerenciamento da informação, local este nomeado de Central de Processamento de Dados (CPD), cujo acesso é restrito, uma vez que é um ambiente delicado e qualquer imprevisto pode comprometer a operação da empresa por tempo indeterminado, causando prejuízos inestimáveis. Este local é apresentado na Figura 84.

Figura 81 - CPD da filial Fomus.



Fonte: o autor *in loco*.

Na Figura 84, a estrutura que comporta os equipamentos chama-se Rack sendo o da esquerda pertencente à empresa ARCOM e o da direita à Fomus. Essa estrutura comporta os *Patch Panels*, cuja função é de intermediar a conexão de rede cabeada distribuída pelo andar com os equipamentos do CPD além de proteger os *switch's* contra danos por manuseio incorreto.

Estão sendo utilizados 3 equipamentos *switch* sendo 2 deles PoE (*Power over Ethernet*). O switch direciona o tráfego de rede para o dispositivo de destino apropriado, encaminhando os pacotes pela rota mais curta com base nos endereços MAC (*Media Access Control*). Um *switch PoE* é uma variante que oferece uma funcionalidade adicional: ele pode fornecer energia elétrica aos dispositivos conectados por meio dos cabos de rede Ethernet. Isso elimina a necessidade de fontes de alimentação separadas para dispositivos como telefones IP, câmeras de segurança, pontos de acesso Wi-Fi e outros equipamentos de rede.

Neste Rack estão também o modem fornecido pela provedora Algar Telecom, o qual fornece o serviço de internet recebido por fibra óptica, com uma velocidade contratada de 300 Mbps, e liga-se ao Roteador Gigabit *Broadband* com Balanceamento de Carga (*Load Balancer*) TP Link TL-ER5120, onde é feito o roteamento entre as redes 192.168.154.0/24 da Fomus com a rede 192.168.150.0/24 destinada a Agroporto.

Outros equipamentos ali presentes são um servidor de banco de dados, o qual hospeda aplicações de contabilidade, e alguns *Nobreak's*, para impedir o desligamento repentino dos equipamentos em momentos de falta de energia, no período até o gerador do prédio entrar em atividade.

A filial Agroporto está localizada na zona rural de Tupaciguara e possui vários quilômetros de extensão, além do escritório principal, apresentado pela Figura 85, são vários pontos de operação da empresa, alojamentos e pontos de câmeras que necessitam de conectividade com a rede.

Figura 82 - Escritório principal da empresa Agroporto.



Fonte: o autor *in loco*.

A antena de recepção do *backbone* juntamente com o rádio, que fica acoplado a mesma, está instalado na torre que faz parte da infraestrutura do silo. Um cabo de rede Cat6 blindado de capa dupla conecta o rádio ao roteador, localizado no CPD mostrado na Figura 86, entrando na porta WAN e distribuindo a partir das portas LAN's a rede já roteada para a faixa 192.168.41.0/24, alimentando um switch fast (conexões de até 100 Mbps) que distribui a rede aos equipamentos como os servidores, equipamentos dos enlaces de acesso, pontos de acesso Wi-Fi, câmeras e etc.

Figura 83 - Equipamentos de rede e servidores Agroporto.



Fonte: o autor *in loco*.

4.2 EQUIPAMENTO DE RÁDIO DO BACKBONE – AIRFIBER 5X HD

Nos dois enlaces apresentados nesta monografia que compõem o *backbone* o equipamento de rádio em uso escolhido pela empresa é o “*airFiber 5X HD*” (Figura 87), chamado de “*AF-5XHD*”, desenvolvido pela Ubiquiti.

Este equipamento da Ubiquiti apresenta uma série de recursos avançados, destacando-se pela potência de saída automática, ajustando-se automaticamente ao nível apropriado para otimizar o desempenho. Sua potência de transmissão é programável, permitindo ajustes até +29 dBm para atender a requisitos específicos. Além disso, oferece flexibilidade na taxa de *downlink* e *uplink*, suportando tráfego assimétrico conforme necessário, e a capacidade de dividir as frequências de transmissão e recepção, proporcionando uma solução altamente flexível para evitar interferências.

A sincronização GPS é configurável, adaptando-se a diferentes quadros temporais, enquanto a capacidade de adaptação da modulação até 4096QAM suporta taxas avançadas de modulação. Com duas portas *Ethernet Gigabit* redundantes, o “*AF-5XHD*” oferece redundância para alimentação PoE. A presença de configuração sem fio Bluetooth simplifica a configuração, enquanto o “*AlignLock™ Antenna Aiming Guard*” alerta sobre alterações no rádio ou no alinhamento da antena.

O “*AF-5XHD*” apresenta uma eficiência espectral líder do setor de 21,2 bps/Hz, processamento de pacotes de dados em taxa de linha de até 1,34 Gbps. A frequência de operação global suportada pelo equipamento é de 4,8 até 6,2 GHz, e a disponibilidade vai depender do licenciamento da região de operação, no caso do Brasil o equipamento permite de 5,17 até 6,20 GHz.

Para garantir confiabilidade, o equipamento permite a criação de imagens de firmware de backup para configuração à prova de falhas. A análise persistente de espectro com RX dedicado proporciona uma visão em tempo real de toda a banda em links ativos sem interrupção. Além disso, o AF-5XHD opera em uma ampla faixa de tensão de 19 a 50VDC, oferecendo uma proteção aprimorada contra surtos. Mais informações podem ser obtidas consultando o Datasheet disponível em (43).

Figura 84 - AF-5XHD.



Fonte: extraído de (43).

As Figuras 88 e 89 apresentam duas tabelas, extraídas do datasheet, as quais são importantes para a avaliação da capacidade de transmissão do radioenlace, baseado na qualidade do sinal recebido.

Figura 85 - Tabela da sensibilidade do sinal de recepção por tipo de modulação e largura de banda do canal.

		Receive Sensitivity (dBm)							
Modulation Rate	Modulation	Sensitivity							
		10 MHz	20 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	80 MHz	100 MHz
12x	4096QAM	-56	-53	-51	-49	-47	-44	-42	-39
10x	1024QAM	-66	-63	-61	-59	-57	-55	-53	-51
8x	256QAM	-72	-69	-67	-65	-63	-61	-59	-57
6x	64QAM	-78	-75	-73	-71	-69	-67	-65	-63
4x	16QAM MIMO	-84	-81	-79	-77	-75	-73	-71	-69
2x	QPSK MIMO	-88	-85	-83	-82	-81	-80	-79	-78
1x	½ Rate QPSK xRT	-90	-87	-85	-84	-83	-82	-81	-80

Fonte: extraído de (43).

Figura 86 - Taxa de dados máxima por tipo de modulação e largura de banda do canal.

TDD Capacity (Mbps)*									
MCS		Channel Width							
		10 MHz	20 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	80 MHz	100 MHz
QPSK SISO	Upload	5.76	12.16	18.24	24.32	29.76	35.20	45.44	54.72
	Download	5.76	12.16	18.24	24.32	29.76	35.20	45.44	54.72
	Aggregate	11.52	24.32	36.48	48.64	59.52	70.40	90.88	109.44
QPSK MIMO	Upload	11.52	24.32	36.48	48.64	59.52	70.40	90.88	109.44
	Download	11.52	24.32	36.48	48.64	59.52	70.40	90.88	109.44
	Aggregate	23.04	48.64	72.96	97.28	119.04	140.80	181.76	218.88
16 QAM MIMO	Upload	23.04	48.64	72.96	97.28	119.04	140.80	181.76	218.88
	Download	23.04	48.64	72.96	97.28	119.04	140.80	181.76	218.88
	Aggregate	46.08	97.28	145.92	194.56	238.08	281.60	363.52	437.76
64 QAM MIMO	Upload	34.56	72.96	109.44	145.92	178.56	211.20	272.64	328.32
	Download	34.56	72.96	109.44	145.92	178.56	211.20	272.64	328.32
	Aggregate	69.12	145.92	218.88	291.84	357.12	422.40	545.28	656.64
256 QAM MIMO	Upload	46.08	97.28	145.92	194.56	238.08	281.60	363.52	437.76
	Download	46.08	97.28	145.92	194.56	238.08	281.60	363.52	437.76
	Aggregate	92.16	194.56	291.84	389.12	476.16	563.20	727.04	875.52
1024 QAM MIMO	Upload	57.60	121.60	182.40	243.20	297.60	352.00	454.40	547.20
	Download	57.60	121.60	182.40	243.20	297.60	352.00	454.40	547.20
	Aggregate	115.20	243.20	364.80	486.40	595.20	704.00	908.80	1,094.40
4096 QAM MIMO	Upload	69.12	145.92	218.88	291.84	357.12	422.40	545.28	656.64
	Download	69.12	145.92	218.88	291.84	357.12	422.40	545.28	656.64
	Aggregate	138.24	291.84	437.76	583.68	714.24	844.80	1,090.56	1,313.28

Fonte: extraído de (43).

A capacidade máxima de transferência de dados do equipamento pode ser atingida utilizando a técnica de modulação mais complexa 4096QAM, atingindo até 1,3 Gbps na largura de banda de 100 MHz, porém é bem sensível a ruídos, sendo necessário um sinal de recepção de pelo menos -39 dBm.

4.3 ANTENAS UTILIZADAS NO BACKBONE

4.3.1 Enlace Fomus até Munari

No enlace de maior distância é utilizada uma antena nacional desenvolvida pela empresa ALGcom. O modelo da antena é “UHPX-5800-35-12-DP”. Ela está instalada no topo do prédio UBT em um cavalete, como pode ser visto nas Figura 90 e 91, e utilizando radome para maior proteção do alimentador contra chuva, e também para proporcionar maior imunidade a ruído.

Figura 87 - Antena ALGcom do Backbone instalada no topo do UBT.



Fonte: o autor *in loco*.

Figura 88- Antena do enlace Fomus até Munari vista de frente.



Fonte: o autor *in loco*.

A Figura 92, extraída do datasheet do equipamento, informa que a antena é capaz de operar nas frequências de 4,9 até 6,425 GHz. O modelo utilizado atualmente pela empresa possui diâmetro de 1,2 m, capacidade de ganho maior e maior diretividade, visto que o ângulo de meia potência é menor comparada às outras antenas da mesma série. Além disso, o valor de

VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) indica que a onda refletida é seis vezes menor que a onda incidente, o que é um bom valor. Por fim, ainda sobre este equipamento vale ressaltar que ele suporta polarização dupla vertical e horizontal, ou até mesmo em modo *Slant* que seria essas mesmas polarizações transmitidas em uma inclinação positiva ou negativa de 45°, o qual é o método utilizado atualmente pela empresa.

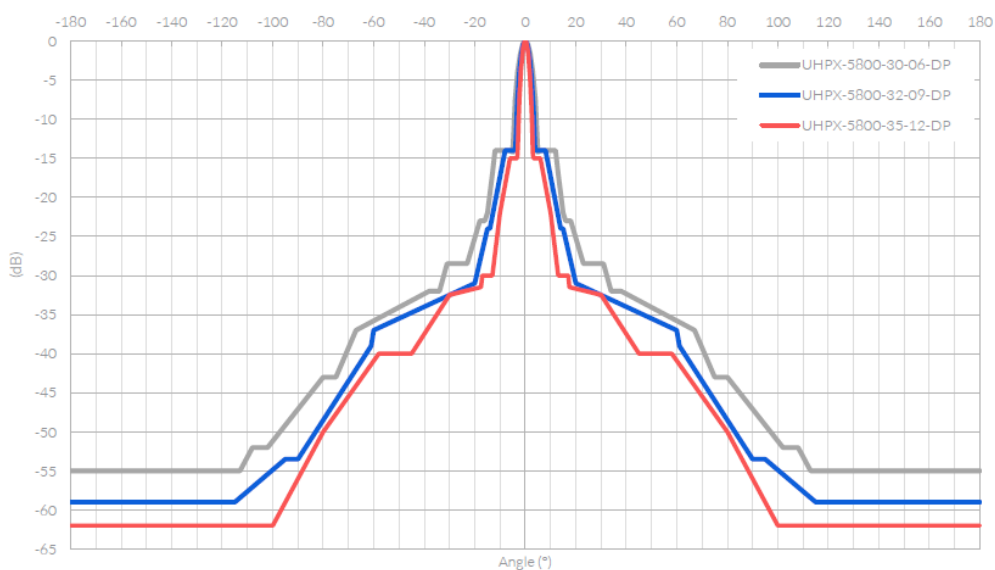
Figura 89 - Características elétricas da antena.

UHPX-5800-XX-XX-DP	30-06	32-09	35-12
Frequência de operação <i>Frequency range/Rango de operación</i>	4.9 - 6.425 GHz		
Diâmetro <i>Diameter/Diámetro</i>	0.6 m	0.9 m	1.2 m
Ganho Banda Alta <i>Gain High Band/Ganancia banda alta</i>	30.5 dBi	33.2 dBi	36.0 dBi
Ganho Banda Média <i>Gain Mid band/ Ganancia Banda media</i>	29.5 dBi	32.5 dBi	34.8 dBi
Ganho Banda Baixa <i>Gain Low band/ Ganancia Banda baja</i>	28.5 dBi	30.0 dBi	33.1 dBi
Ângulo de meia potência <i>Beamwidth/Ángulo de media potencia</i>	5.8°	3.1°	2.4°
Relação frente-costas (165° - 180°) <i>Front-to-back ratio/Relación frente espalda</i>	>55 dB	>59 dB	>62 dB
Isolação por polarização cruzada <i>XPD/Aislamiento de polarización cruzada</i>	>30 dB		
VSWR	1.6:1 (max) 1.5:1 (typ)		
Isolação entre portas <i>Port-to-Port Isolation/Aislamiento entre puertos</i>	>30 dB		
Polarização <i>Polarization/Polarización</i>	Dupla (V e H ou +/- 45°) Double (V and H or +/- 45°) Doble (V y H o +/- 45°)		
Conexão <i>Antenna input/Conexión</i>	N Fêmea ou SMA Fêmea Reverso N female or SMA Female reverse N Hembra o SMA Hembra reverse		

Fonte: extraído de (44).

Um elemento importante apresentado no datasheet do equipamento é o diagrama de radiação, mostrado na Figura 93.

Figura 90 - Diagrama de radiação da antena ALGcom.

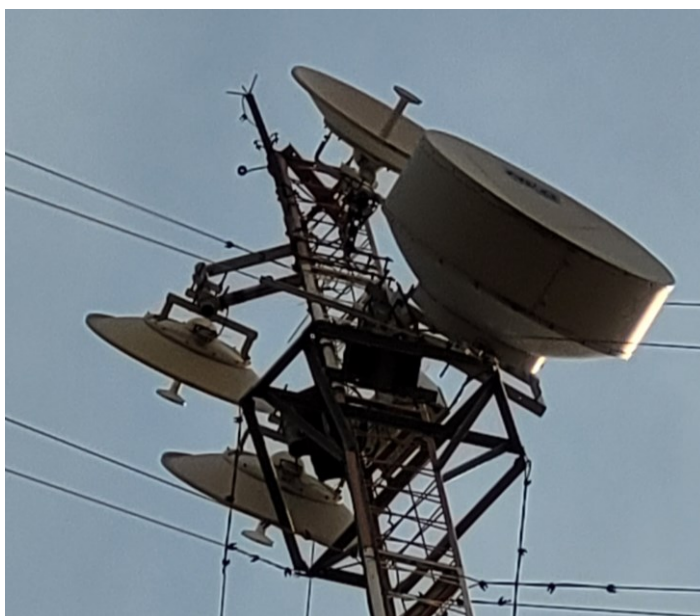


Fonte: extraído de [43].

4.3.2 Enlace Munari até Agroporto

Esse enlace utiliza uma antena de custo um pouco menor comparada à anterior, é o modelo “*Ubiquiti Rocket Dish RD-5G34*”, o qual pode ser visto na Figura 94, onde a antena superior pertence a outra empresa e está inativada devido a substituição do uso do enlace pela tecnologia Starlink.

Figura 91 - Antenas instaladas no topo da Torre na estação da Fazenda Munari.



Fonte: o autor *in loco*.

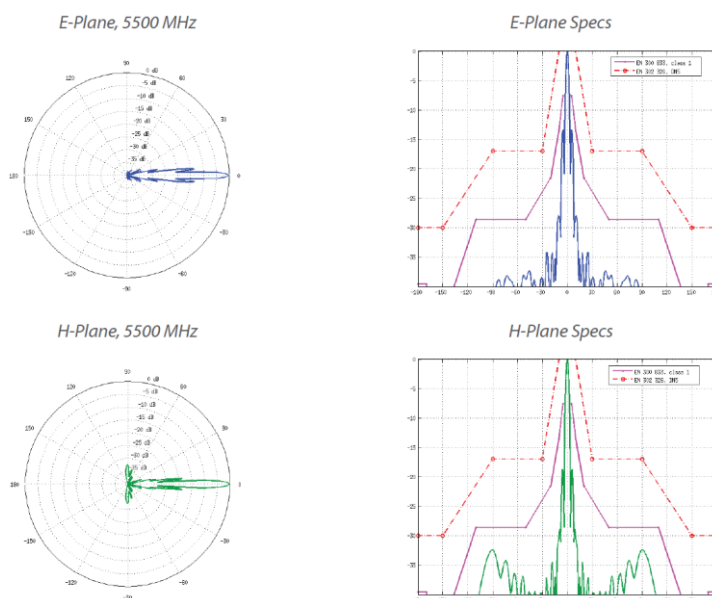
As especificações deste equipamento e o diagrama de radiação são mostrados pelas Figuras 95 e 96.

Figura 92 - Características da antena RD-5G34.

Antenna Characteristics					
Model	RD-2G24	RD-3G26	RD-5G30	RD-5G30-LW	RD-5G34
Dimensions*	650 x 650 x 295 mm (25.6 x 25.6 x 11.61")	650 x 650 x 300 mm (25.6 x 25.6 x 11.81")	650 x 650 x 304 mm (25.6 x 25.6 x 11.97")	650 x 650 x 386 mm (25.6 x 25.6 x 15.2")	1050 x 1050 x 421 mm (41.34 x 41.34 x 16.57")
Weight**	9.8 kg (21.61 lb)	9.8 kg (21.61 lb)	9.8 kg (21.61 lb)	7.4 kg (16.31 lb)	13.5 kg (29.76 lb)
Frequency Range	2.3 - 2.7 GHz	3.3 - 3.8 GHz	4.9 - 5.8 GHz	5.1 - 5.9 GHz	4.9 - 5.8 GHz
Gain	24 dBi	26 dBi	4.9 GHz: 26 dBi 5 - 5.9 GHz: 30 dBi	30 dBi	4.9 GHz: 30 dBi 5 - 5.8 GHz: 34 dBi
HPOL Beamwidth	6.6° (3 dB)	7° (3 dB)	5° (3 dB)	5.8° (3 dB)	3° (3 dB)
VPOL Beamwidth	6.8° (3 dB)	7° (3 dB)	5° (3 dB)	5.8° (3 dB)	3° (3 dB)
F/B Ratio	28 dB	33 dB	34 dB	30 dB	42 dB
Max. VSWR	1.6:1	1.4:1	1.4:1	1.6:1	1.4:1
Wind Loading	787 N @ 200 km/h (177 lbf @ 125 mph)			790 N @ 200 km/h (178 lbf @ 125 mph)	1,779 N @ 200 km/h (400 lbf @ 125 mph)
Wind Survivability	200 km/h (125 mph)				
Polarization	Dual-Linear				
Cross-pol Isolation	35 dB Min.				
ETSI Specification	EN 302 326 DN2				
Mounting	Universal Pole Mount, Rocket Bracket, and Weatherproof RF Connectors Included				

Fonte: extraído de (45).

Figura 93 - Diagrama de radiação da antena RD-5G34.



Fonte: extraído de (45).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados concretos provenientes de testes reais do enlace em estudo, oferecendo uma visão do desempenho sob as atuais condições. Além disso são apresentados os resultados de uma nova simulação no Pathloss considerando agora as condições o mais próximo possível da real. Essa abordagem visa proporcionar uma base sólida para comparações significativas entre os resultados obtidos empiricamente e as projeções derivadas da simulação. A análise detalhada desses dados contribui para uma compreensão aprofundada do comportamento do sistema em diferentes cenários, destacando áreas de eficiência e possíveis pontos de aprimoramento. Essa metodologia de avaliação abrangente busca não apenas documentar os resultados observados, mas também fornecer informações valiosas para o refinamento contínuo e otimização do enlace, contribuindo para uma compreensão abrangente de seu desempenho e potencial de aprimoramento.

5.1 SIMULAÇÃO DO ENLACE FOMUS ATÉ MUNARI SOB CONDIÇÕES REAIS

No Capítulo 3 são mostradas as diversas simulações realizadas para o estudo do radioenlace sob diferentes características de transmissão e principalmente considerando as antenas dispostas em uma altura que atendessem os critérios de visibilidade.

Para o enlace entre a filial Fomus e a fazenda Munari, como mencionado na seção 3.4.3, a empresa utiliza uma torre estaiada de 48 m de altura. A antena está posicionada em uma altura um pouco abaixo do topo da torre, a qual segundo o GPS do rádio AF-5XHD é de 43 m (altura total do rádio em relação ao mar subtraído pela altura do relevo, conforme Tabela 8), como mostra a Figura 97.

Figura 94 - Dados de localização e altitude informados pelos rádios de Rx e Tx.

REDE				REDE			
DATA PORT SPEED	1000 Mbps-Full	MGMT PORT SPEED	Not Plugged	DATA PORT SPEED	1000 Mbps-Full	MGMT PORT SPEED	Not Plugged
DATA CABLE SNR	+29 dB			DATA CABLE SNR	+28 dB		
DATA CABLE LENGTH	< 20 m			DATA CABLE LENGTH	< 20 m		
TX/RX ERRORS	0/0			TX/RX ERRORS	0/0		
GPS				GPS			
SATELLITES TRACKED	9	LOCAL	-18.90856 -48.261452	SATELLITES TRACKED	8	LOCAL	-18.541121 -48.747883
SYNCHRONIZATION	On	ALTITUDE	974 m (3196 ft)	SYNCHRONIZATION	On	ALTITUDE	960 m (3150 ft)
GPS SIGNAL QUALITY	100 %			GPS SIGNAL QUALITY	100 %		

Fonte: o autor.

Na simulação também são considerados a frequência de transmissão central de 6125 MHz, polarização *slant*, ganho da antena de 34 dBi e a potência do transmissor de 29 dBm, conforme a Figura 98 extraída da página de gerenciamento Web do rádio.

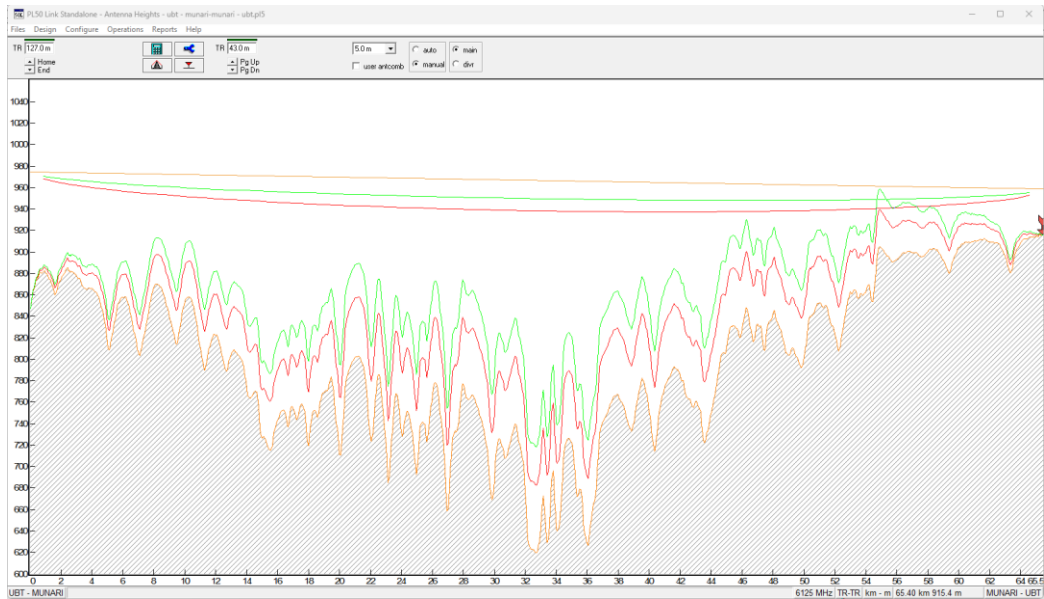
Figura 95 - Dados gerais de parâmetros do rádio.

Summary				Details			
DEVICE MODEL	AF-5XHD	VERSION	v1.5.0	DEVICE MODEL	AF-5XHD	VERSION	v1.5.0
ENDEREÇO MAC:	78:8A:20:5F:D3:7C	DATA	2023-06-20 17:57:04	ENDEREÇO MAC:	78:8A:20:5F:D5:07	DATA	2023-06-20 17:57:03
MODO DE REDE	Ponte	TEMPO DE DISPONIBILIDADE	1 day 08:53:29	MODO DE REDE	Ponte	TEMPO DE DISPONIBILIDADE	46 days 05:45:44
MEMORY	84 %	SERVICE UPTIME	100%	MEMORY	85 %	SERVICE UPTIME	99.9%
		CPU	49 %			CPU	43 %
WIRELESS				WIRELESS			
MODO SEM FIO	Master			MODO SEM FIO	Estação		
TX/RX BYTES	341 G / 427 G			TX/RX BYTES	12.9 T / 10.7 T		
FRAME LENGTH	2 ms			UL/DL UTILIZATION	15.4% / 1.9%		
TX FREQUENCY	6125 [6075 - 6175] MHz			TX FREQUENCY	6125 [6075 - 6175] MHz		
CHANNEL WIDTH	100 MHz			CHANNEL WIDTH	100 MHz		
ANTENNA GAIN	34 dBi			ANTENNA GAIN	34 dBi		
CABLE LOSS	0 dB			CABLE LOSS	1 dB		
COUNTRY	Licensed (5170-6200 MHz) (Other)			COUNTRY	Licensed (5170-6200 MHz) (Other)		
CINR	+25 dB			CINR	+28 dB		
SEGURANÇA DA CONEXÃO SEM FIO	On			CONNECTION TIME	1 day 08:52:43		
DL/UL RATIO	50% / 50%			EFFICIENCY	5.65 bps/Hz		
EFFICIENCY	11.04 bps/Hz			TX POWER	18 dBm		
TX POWER	29 dBm			TX EIRP	51 dBm		
TX EIRP	63 dBm			MAX TX MODULATION	12X (4096QAM)		
MAX TX MODULATION	12X (4096QAM)						

Fonte: o autor.

A Figura 99 apresenta o perfil de transmissão do enlace em questão utilizando as alturas reais atuais das antenas, a qual é possível observar que os critérios de visibilidade não são atendidos, uma vez que há obstruções no elipsóide para correção da curvatura por Kmín, invadindo a área correspondente a 60 % de liberação exigida para esta correção.

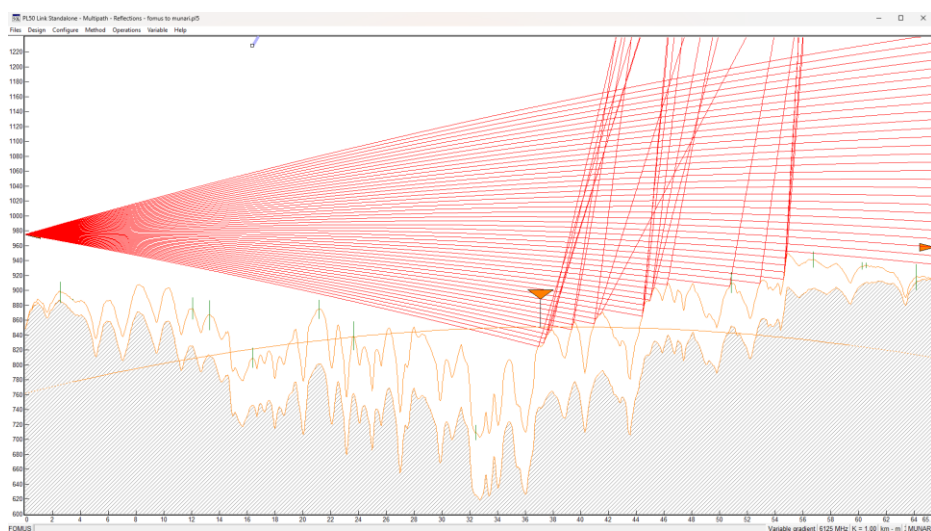
Figura 96 - Perfil de propagação no Pathloss considerando as alturas reais das antenas.



Fonte: o autor.

Na Figura 100 é utilizada a ferramenta do Pathloss de *Variable Gradient Ray Tracing* (VGR), a qual usa o conceito de traçado de raios para simular como as ondas se propagam no ambiente, calculando a trajetória dos raios em relação aos obstáculos e à topografia do terreno. A partir dessa modelagem fica mais claro o efeito dos obstáculos no enlace, causando refração e reflexão das ondas eletromagnéticas.

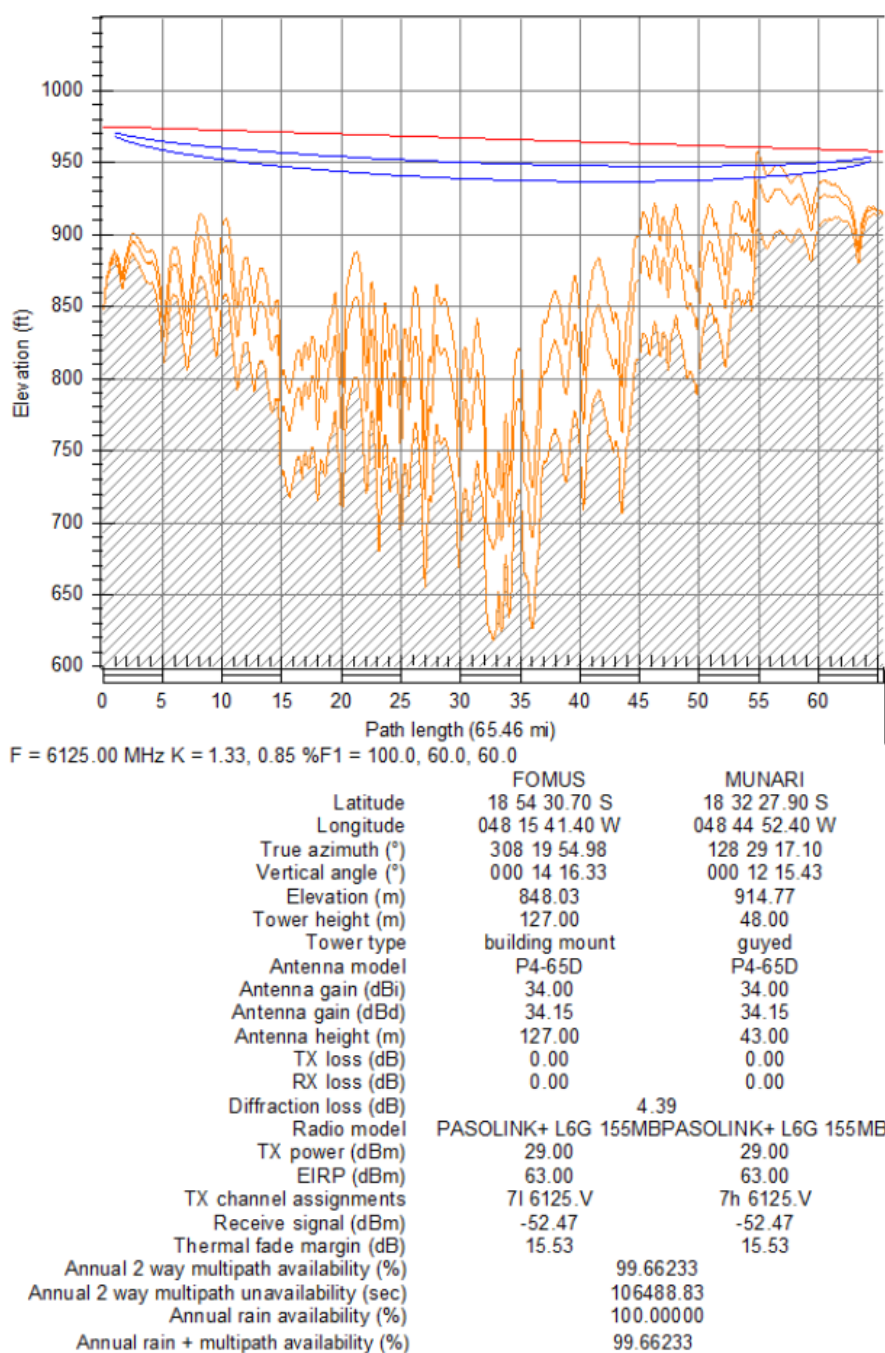
Figura 97 - VGR do enlace de Fomus até Munari



Fonte: o autor.

Ao comparar os resultados da Figura 101 com os da Figura 67, onde foram utilizadas as alturas das antenas estimadas pelo cálculo teórico, verifica-se uma degradação do sinal de recepção de aproximadamente 4 dBm, considerando uma margem de imprecisão de 3 dBm para o enlace real operando nessas condições, esse valor poderia atingir até 7 dBm de diferença, ou seja, um sinal recebido de aproximadamente -56 dBm.

Figura 98 - Novos resultados simulados no Pathloss utilizando as alturas reais das antenas.

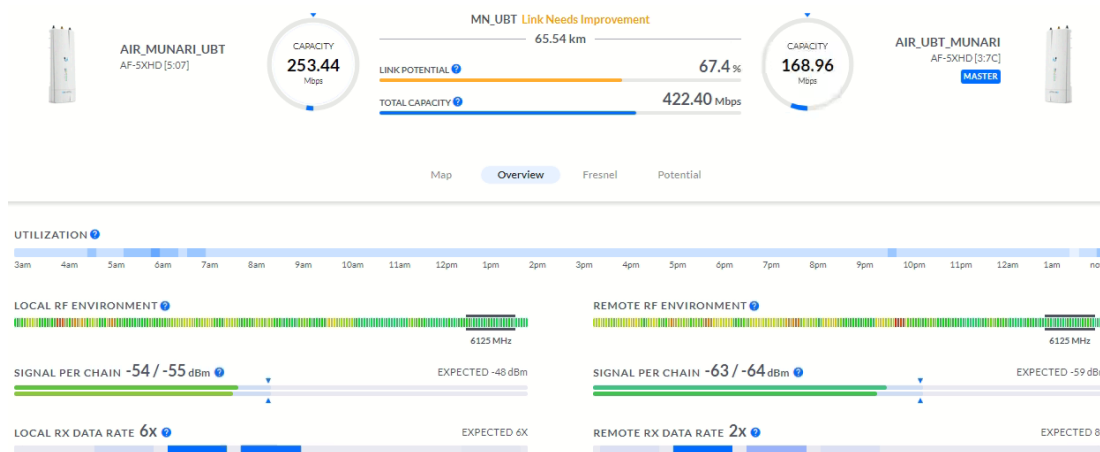


Fonte: o autor.

5.2 DADOS REAIS DO EQUIPAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO ENLACE FOMUS ATÉ MUNARI

A Figura 102 apresenta a leitura do equipamento do enlace, indicando a necessidade de alguns ajustes finos para otimização da qualidade e estabilidade do *link*, o qual nessas condições poderia provocar perda de alguns pacotes e muita variação na capacidade de transmissão, devido a mudança constante da técnica de modulação utilizada. Vale ressaltar que o sinal recebido registrado nesta figura de até -55 dBm ficou muito próximo do valor teórico calculado e do simulado no Pathloss, o qual foi de -52,47 dBm (como pode ser consultado na Figura 101), diferindo de aproximadamente 3 dBm, demonstrando que o software é uma ferramenta essencial que pode ser utilizada com segurança pelo engenheiro, para que se possa dimensionar adequadamente um enlace de rádio.

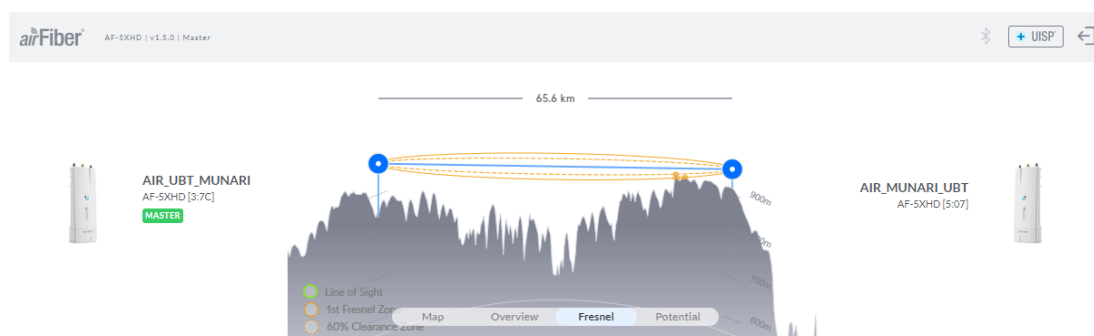
Figura 99 - Leitura do equipamento para as características mencionadas anteriormente.



Fonte: o autor.

O próprio equipamento de RF apresenta um perfil de terreno, como o do Pathloss, posicionando as antenas na altura detectada pelo GPS, e desenhando o elipsoide de Fresnel, como pode ser visto na Figura 103. Novamente esta falha de projeto foi prevista pelos cálculos teóricos e simulações, aproximando da Figura 99.

Figura 100 - Zona de Fresnel apresentada pelo software do AF-5XHD.



Fonte: o autor.

Uma vez que o equipamento possui uma função prática de modo teste, onde pode ser feita alterações dos parâmetros de transmissão sem o risco de o enlace ficar inoperante por muito tempo (evitando até mesmo a necessidade de uma visita em campo devido perda de comunicação por ajustes errôneos), foram extraídas leituras do equipamento para diferentes configurações. Estes testes foram praticados fora do horário de operação da empresa, para não prejudicar o funcionamento da mesma. As Tabelas 13 e 14 foram feitas para facilitar a comparação dos resultados:

Tabela 13 – Valores lidos pelo rádio transmissor para diferentes parâmetros.

Tx [EIRP = 63 dBm]								
F.I [MHz]	5220	5900		6125				
BW [MHz]	100	80	100	20	50	60	80	100
L.P [%]	35	99	84,7	66,9	77,4	80	81,3	67,4
S.R [dBm]	-66~70	-58	-62	-65	-61~63	-61~63	-59~60	-63~64
Ef.S [bps/Hz]	7,96	11,59	8,30	6,2	9,30	8,97	8,60	7,08
Data [Mbps]	84,48	279,04	253,44	53,76	136,32	161,28	209,28	168,96
Mod.	QPSK	256 QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	256QAM	64QAM

Tabela 14 – Valores lidos pelo rádio receptor para diferentes parâmetros.

Rx [EIRP = 63 dBm]								
F.I [MHz]	5220	5900		6125				
BW [MHz]	100	80	100	20	50	60	80	100
L.P [%]	35	99	84,7	66,9	77,4	80	81,3	67,4
S.R [dBm]	-63~64	-49~50	-52~54	-57	-51~53	-52	-50~51	-54~55
Ef.S [bps/Hz]	2,75	11,74	8,46	4,9	9,36	9,17	5,87	5,21
Data [Mbps]	253,44	281,60	253,44	55,68	136,32	217,60	211,20	253,44
Mod.	16QAM	256QAM	64QAM	64QAM	64QAM	256QAM	256QAM	64QAM

Na tabela são utilizadas as seguintes abreviaturas:

- **F.I:** para frequência intermediária;
- **BW:** para o valor de largura de banda (*bandwidth*);
- **L.P:** para a medida de qualidade do enlace (*Link Potential*);
- **S.R:** para o sinal recebido;
- **Ef.S:** para a eficiência espectral;
- **Data:** para a capacidade máxima de dados;
- **Mod.:** para a modulação utilizada.

Analisando os resultados obtidos apresentados nas Tabelas 13 e 14 vê-se a pior qualidade do sistema ao utilizar uma frequência de transmissão mais baixa dentre as disponíveis, como a de 5220 MHz onde a qualidade do link foi de 35%, podendo apresentar muitas falhas críticas, não sendo nada confiável. Em contrapartida o melhor resultado, o qual foi mantido após este estudo, otimizando o sistema foi utilizando-se a frequência recomendada pelo equipamento de 5900 MHz, alcançando maior estabilidade com uma largura de banda de 80 MHz, ao invés dos 100 MHz anterior à otimização, chegando à qualidade de 99% do link.

Neste melhor cenário, mesmo com a obstrução avaliada no estudo, os resultados foram satisfatórios e já garantem uma ótima confiabilidade do sistema com alta disponibilidade e capacidade. Comparando com os resultados utilizando-se outras configurações percebe-se que o sinal recebido foi o melhor, provando que a qualidade do enlace é altamente relacionada ao mesmo. Além disso, a diferença entre os valores de eficiência espectral e capacidade de dados

foram mínimas entre o transmissor e o receptor, incluindo utilizando da mesma técnica de modulação todo o tempo, o que contribui também para uma maior estabilidade.

O fato de o sistema ter se comportado melhor utilizando uma largura de banda de 80 MHz ao invés de 100 MHz está atrelado ao fato de quanto maior a largura de banda mais o sinal fica susceptível a interferências. Como o enlace possui uma distância considerável, partindo de uma cidade onde existem vários outros radioenlaces no caminho, e ainda sofre de algumas obstruções quando se considera o fator de correção $K_{mín}$, o uso da largura de banda maior faz o sinal ser mais bombardeado por esses fatores degradantes, forçando-o a alternar sua técnica de modulação para evitar a perda do link.

Em relação à potência de transmissão, são feitos alguns testes utilizando um valor menor do que o máximo disponível no equipamento, porém qualquer valor menor ocasionou em uma piora da qualidade do enlace, isto ocorre devido principalmente à distância ser longa, mesmo configurando o rádio para gerenciar essa potência de forma automática, o mesmo manteve o valor em 29 dBm todo o tempo observado.

A Figura 104 apresenta os registros do equipamento de rádio quando a qualidade do link durante um período de tempo, sendo o gráfico superior antes da otimização feita e o inferior após a otimização.

Figura 101 - Potencial de transmissão antes e após otimização.



Fonte: o autor.

Percebe-se que com as melhorias aplicadas após o estudo o link alcançou uma estabilidade considerável, onde anteriormente o equipamento chegou a registrar um potencial de 56,6 %, enquanto após a otimização o menor registro foi de 87,3%.

5.3 IMPACTO DE CLIMA CHUVOSO NO ENLACE

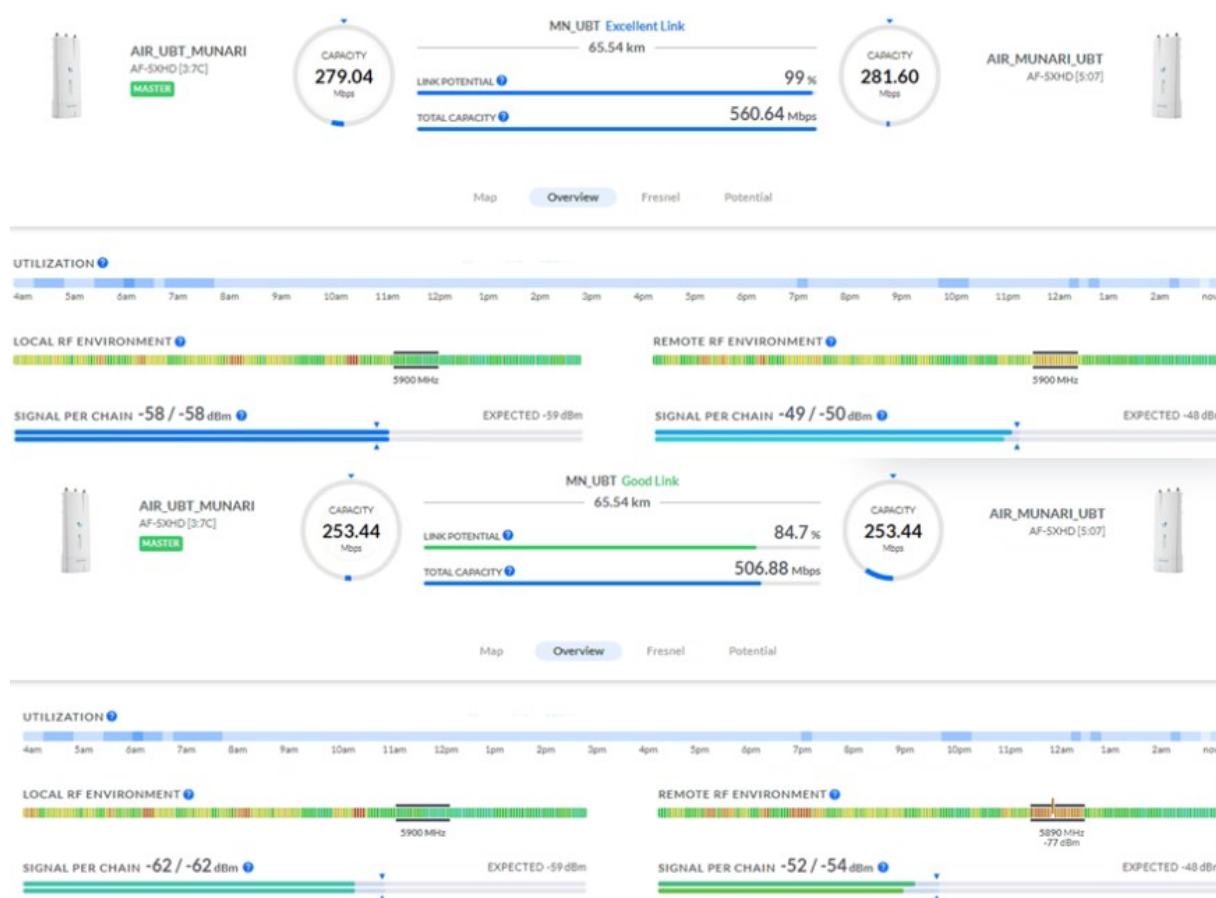
Durante o período dedicado a este trabalho de conclusão de curso foi possível registrar o comportamento do enlace durante um clima chuvoso, como o da Figura 105, na qual a leitura dos equipamentos de transmissão e recepção podem ser observados na Figura 106, sendo o registro superior relacionado a clima limpo e o inferior ao clima chuvoso.

Figura 102 - Registro de chuva intensa na região do enlace.



Fonte: o autor *in loco*.

Figura 103 - Leitura do equipamento em clima limpo e clima chuvoso.



Fonte: o autor.

Como era esperado a partir das conclusões obtidas durante o estudo teórico, uma vez que este enlace opera em frequência abaixo de 8 GHz, o impacto causado pela chuva é bem pequeno, reduzindo pouco a capacidade máxima de tráfego de dados, não tendo impacto considerável na operação da empresa.

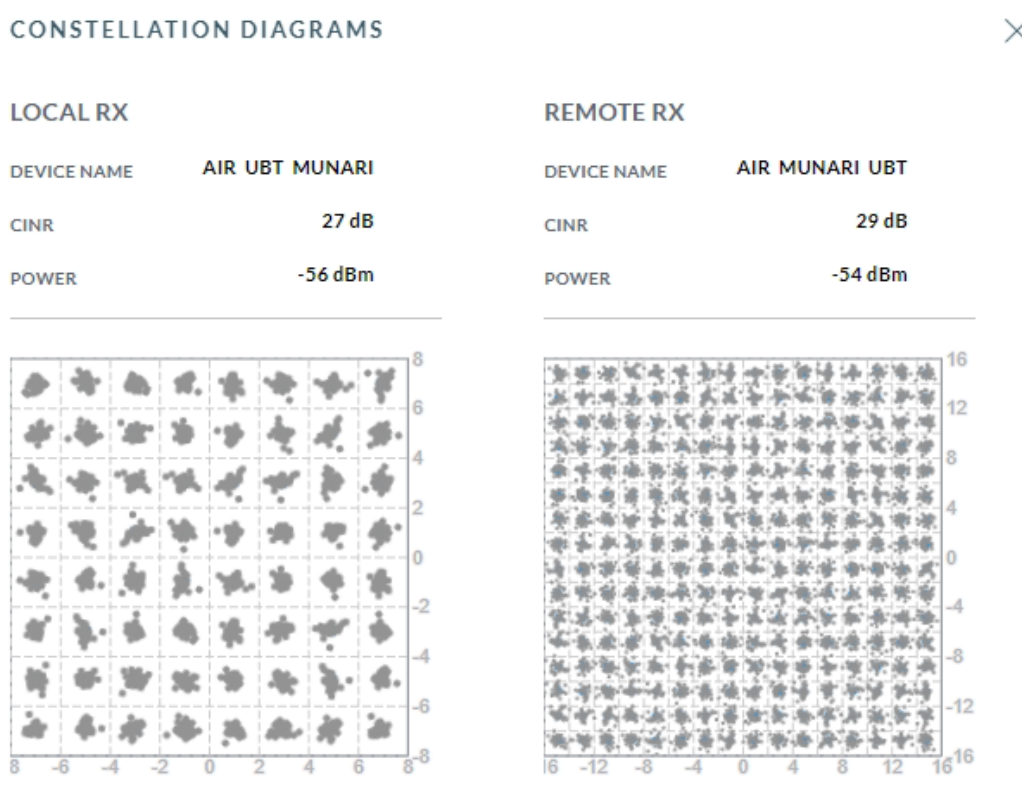
5.4 RECURSO DE SELEÇÃO AUTOMÁTICA DA TÉCNICA DE MODULAÇÃO E SUA IMPORTÂNCIA

O rádio AF-5XHD conta com um recurso interessante que permite ver em tempo real a técnica de modulação aplicada e o impacto do ruído. O equipamento está configurado para utilizar até a modulação mais complexa de 4096QAM, é muito importante deixar que o

equipamento escolha de forma dinâmica a melhor técnica de modulação a ser aplicada pois, como pode ser observado nas Figuras 88 e 89, apesar de técnicas de modulação mais complexas ter a vantagem de trafegar mais dados, elas sofrem mais os efeitos dos ruídos, sendo que o equipamento exige um sinal de -39 dBm para atingir sua maior capacidade. Caso fosse fixado um tipo de modulação, qualquer variação do sinal poderia ocasionar na indisponibilidade do enlace.

A Figura 107 exemplifica a aplicação desta técnica pelo equipamento, em que devido a uma queda de qualidade do sinal o mesmo reduziu a modulação de 256QAM para 64QAM, diminuindo assim o valor exigido de limiar de recepção, permitindo que o enlace continue operante e os usuários nem percebam na prática essa alteração.

Figura 104 - Diagrama de constelação em tempo real.

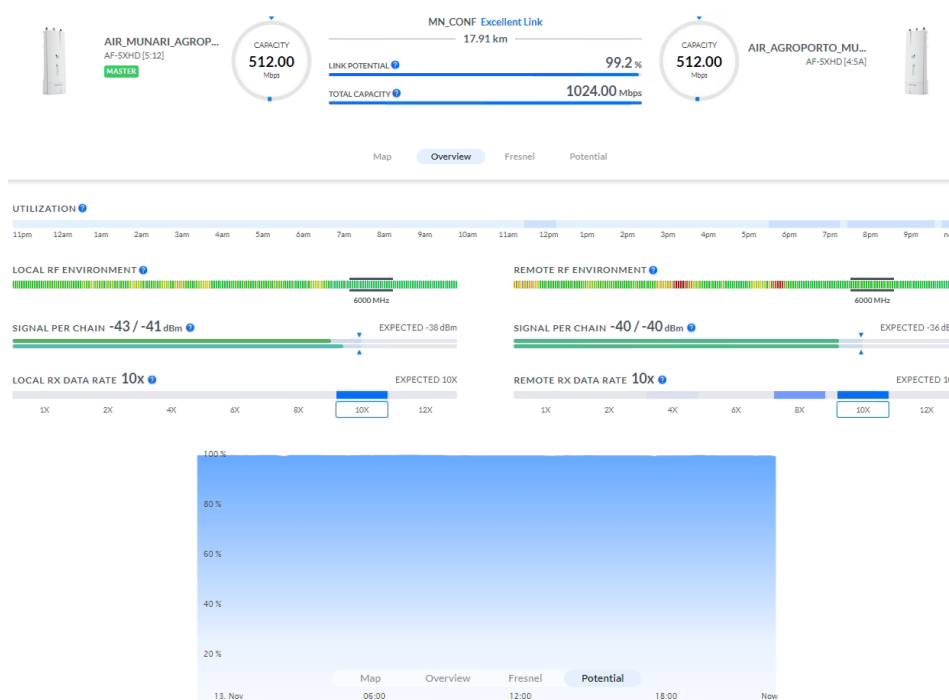


Fonte: o autor.

5.5 DADOS REAIS DO EQUIPAMENTO E QUALIDADE DO ENLACE MUNARI ATÉ AGROPORTO

Na Figura 108 é apresentada a leitura do equipamento pertencente ao segundo enlace do *backbone*, o qual a única otimização aplicada foi subir a largura de banda de 80 MHz para 100 MHz, uma vez que o enlace tem visada direta sem obstruções e com pouca interferência.

Figura 105 - Dados reais do segundo enlace do backbone.



Fonte: o autor.

Observando a Figura 108 percebe-se que o limitante da capacidade do sistema como um todo é o primeiro enlace, uma vez que a capacidade total de dados do segundo chega a atingir 1 Gbps. Sendo assim, caso a empresa viesse a contratar uma velocidade maior da provedora seria necessário investir na melhoria do primeiro radioenlace, como por exemplo adicionando alguns lances na torre da Fazenda Munari para corresponder aos critérios de visibilidade e melhorar a qualidade do sinal, podendo aproximar da capacidade do segundo enlace, o qual o gráfico de potencial ao longo do tempo é quase linear de tão estável.

5.6 VALIDAÇÃO DO RADIOENLACE: ATENDIMENTO EFETIVO ÀS NECESSIDADES DA EMPRESA

No Capítulo 1 foi apresentado o foco principal deste estudo, nesta seção é feita a validação do cumprimento da demanda da empresa, apresentando registros reais do sistema de telefonia operante, do acesso ao servidor localizado na empresa Agroporto a partir de computadores na filial Fomus e acesso ao sistema de monitoramento.

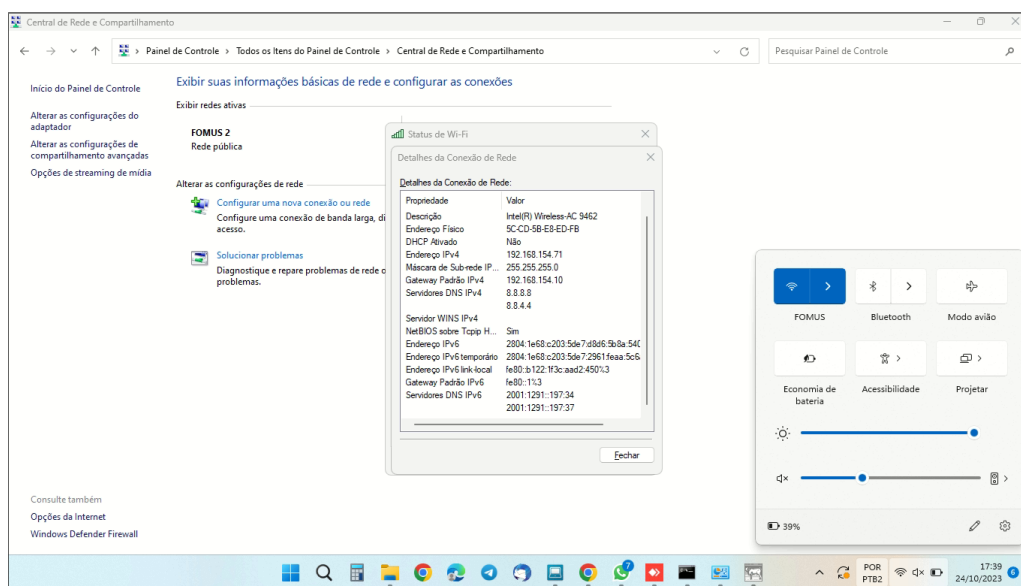
Esta seção é estruturada na apresentação de figuras com uma breve descrição esclarecendo o que elas representam no âmbito do atendimento da necessidade da empresa.

5.6.1 Conectividade das estações da Fomus com o servidor localizado na Agroporto

Para suprir essa demanda, além do radioenlace projetado e otimizado, são necessários regras de roteamento para que um pacote de rede enviado tenha conhecimento de seu destino e do melhor caminho. A Figura 109 foi registrada a partir de um notebook na empresa Fomus conectado na rede por conexão Wi-Fi, sendo assim, seu endereço IP foi atribuído na faixa já mencionada anteriormente de 192.168.154.0/24, fato de o gateway ser final 10 ao invés de 1 será esclarecido mais adiante e está relacionado à rota de acesso ao servidor Multibovinos da Agroporto.

O endereço gateway é o endereço IP de um dispositivo em uma rede que atua como ponto de entrada ou saída para outras redes. O gateway padrão IPv4 configurado na estação da Figura 109 faz com que as rotas dos pacotes enviados sejam controladas por este equipamento, que é um roteador pertencente a estrutura de rede do enlace. Os usuários da Fomus que não necessitam de acesso aos servidores da Agroporto utilizam o endereço 192.168.154.1 como gateway padrão, o que faz com que o caminho dos dados enviados seja definido pelo roteador, provido pela ISP Algar Telecom, não os enviando através do enlace.

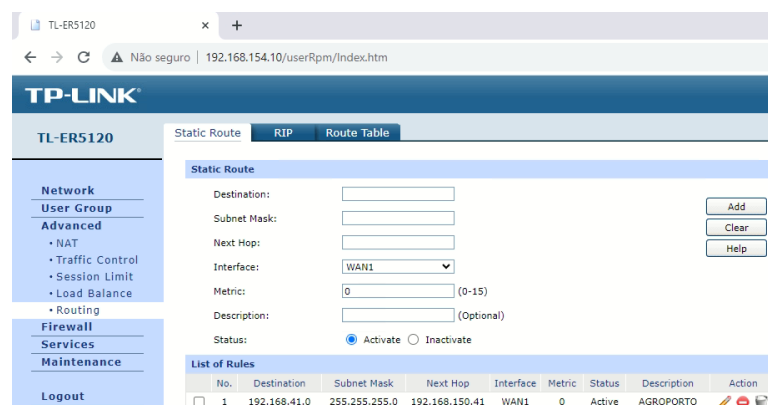
Figura 106 - Estação em uso na empresa Fomus conectada por Wi-Fi.



Fonte: o autor.

A regra de rota estática, configurada no roteador da Fomus e mostrada na Figura 110, faz o dispositivo ter conhecimento que este caminho existe, e sempre que um pacote originado na rede da Fomus precise atingir o servidor localizado na Agroporto, o qual tem um endereço de IP pertencente ao escopo 192.168.41.0/24, o equipamento sabe que deve direcioná-lo até o roteador da Agroporto, cujo gateway conhecido a partir desta localização na rede é 192.168.150.41, o qual é o endereço da interface WAN do dispositivo de destino (porta externa), enquanto que para os dispositivos da Agroporto esse mesmo gateway tem o endereço 192.168.41.1, relacionado a interface LAN (porta interna).

Figura 107 - Regra de roteamento presente no roteador localizado na Fomus.



Fonte: o autor.

A Figura 111 apresenta a configuração da interface WAN do roteador utilizado pela Fomus para atingir a rede da Agroporto. O endereço IP de gateway da Figura 109 está relacionado a interface LAN do roteador, para a rede da faixa 150 este pacote originado na rede da Fomus, ao passar pelo roteador, terá endereço de origem conhecido como 192.168.150.15, o qual poderá atingir qualquer equipamento pertencente a este escopo, como os equipamentos de rádio do *backbone* que possuem os IP's 192.168.150.20 o primeiro, 192.168.150.21 o segundo, 192.168.150.22 o terceiro e 192.168.150.23 o último, o qual é conectado ao roteador da Agroporto.

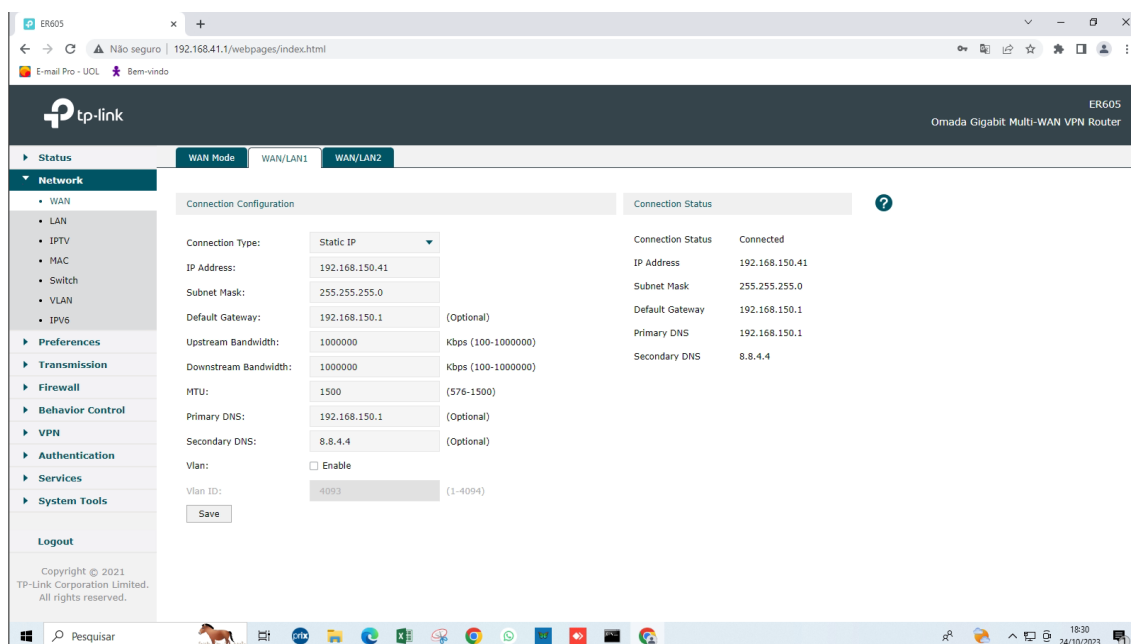
Figura 108 - Configuração da interface WAN do roteador da Fomus.

WAN1	Link Up
Primary Connection:	Static IP
Status:	Connected
IP Address:	192.168.150.15
Subnet Mask:	255.255.255.0
Gateway:	192.168.150.1
MAC Address:	64-70-02-B5-B8-A3
Secondary Connection:	---
Status:	---
IP Address:	---
Subnet Mask:	---

Fonte: o autor.

Ao passar pelo último rádio e atingir o roteador da Agroporto, o pacote de dados originado na rede da Fomus é novamente roteado para a rede interna da empresa, isso é feito no momento em que o pacote atinge a interface WAN do roteador de IP 192.168.150.41. A interface WAN é mostrada na Figura 112.

Figura 109 - Configuração da WAN do Roteador da empresa Agroporto.



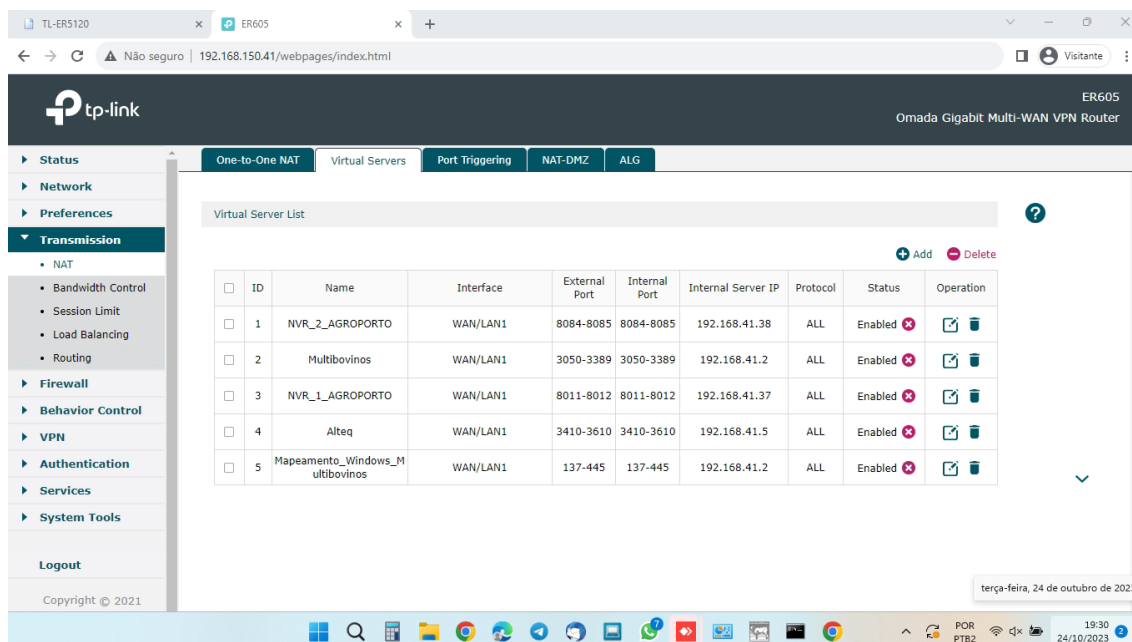
Fonte: o autor.

Uma vez que o pacote atingiu agora a rede de destino, a próxima etapa é atingir o dispositivo de destino, nesse caso o servidor da Agroporto que hospeda o software Multibovinos, para isso é utilizado o recurso do roteador chamado "*Virtual Server*" (Servidor Virtual).

A configuração de "*Virtual Server*" em um roteador permite o redirecionamento de tráfego externo da rede para um dispositivo ou serviço específico dentro da rede local. Geralmente utilizado para permitir o acesso externo a serviços internos, como servidores web, câmeras de segurança, ou outros aplicativos.

Essa configuração envolve a abertura de portas específicas no roteador, direcionando o tráfego externo que chega a essas portas para um dispositivo interno específico. A Figura 113 apresenta as portas abertas para acesso aos dispositivos NVR e para acesso ao software Multibovinos. Sendo assim o pacote que foi enviado pela rede Fomus por exemplo, vai atingir o servidor de destino, cujo endereço IP é 192.168.41.2, através das portas dentro da faixa de 3050 até 3389, utilizando protocolos TCP e UDP.

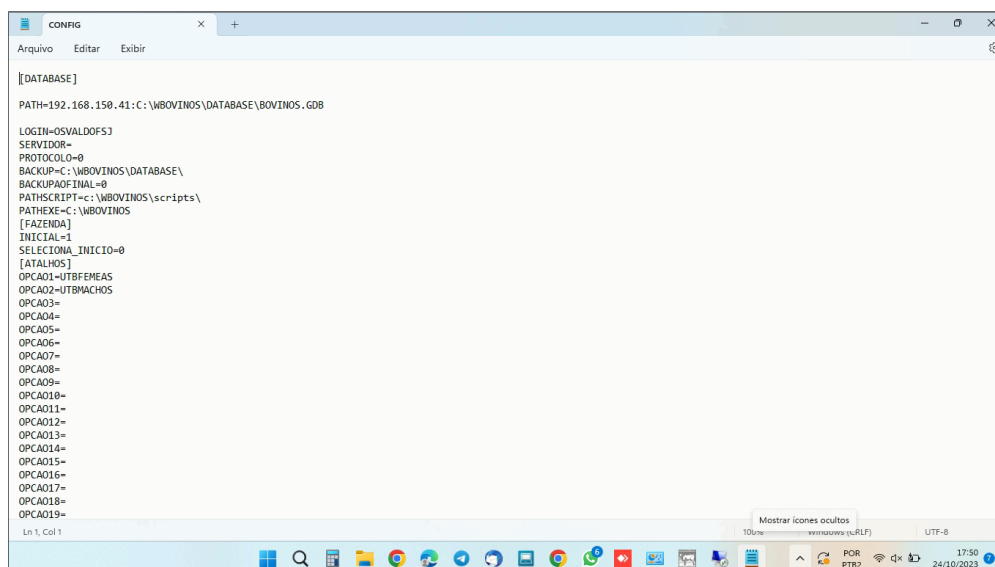
Figura 110 - Configuração de "Virtual Servers" para acesso remoto aos dispositivos da Agroporto.



Fonte: o autor.

A Figura 114 mostra uma configuração que deve ser feito no aplicativo do software Multibovinos para poder autenticar-se a partir da rede da Fomus. Para os usuários da Agroporto o caminho (Path) é 192.168.41.2, que é o endereço local do servidor, e para os usuários da Fomus de ser 192.168.150.41, pelos motivos explanados anteriormente.

Figura 111 - Configuração que deve ser feita para acessar o Multibovinos a partir da Fomus.



Fonte: o autor.

As Figuras 115 e 116 apresentam a utilização do comando “ping” no Windows para avaliar o desempenho da comunicação entre o computador do usuário e o servidor.

Este comando faz a máquina enviar pacotes de dados para o host de destino e aguardar por respostas. Se o host estiver acessível, o comando exibe o tempo que levou para um pacote ser enviado e uma resposta ser recebida (RTT - *Round-Trip Time*). O *ping* é uma ferramenta fundamental para diagnosticar problemas de rede, como verificar se um servidor remoto está alcançável e avaliar a latência da conexão.

Figura 112 - *Ping* no servidor da Agroporto a partir da Fomus antes da otimização do enlace.

```
Prompt de Comando
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=13ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=14ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=14ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=12ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=12ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=24ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=11ms TTL=63

Estatísticas do Ping para 192.168.150.41:
  Pacotes: Enviados = 554, Recebidos = 551, Perdidos = 3 (0% de
  perda),
  Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
  Mínimo = 8ms, Máximo = 122ms, Média = 12ms
Control-C
^C
C:\Users\Cynti>
```

Fonte: o autor.

Figura 113 - *Ping* no servidor da Agroporto a partir da Fomus após a otimização do enlace.

```
Prompt de Comando
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=7ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=12ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=13ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=59ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=12ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=10ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=8ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=9ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.41: bytes=32 tempo=8ms TTL=63

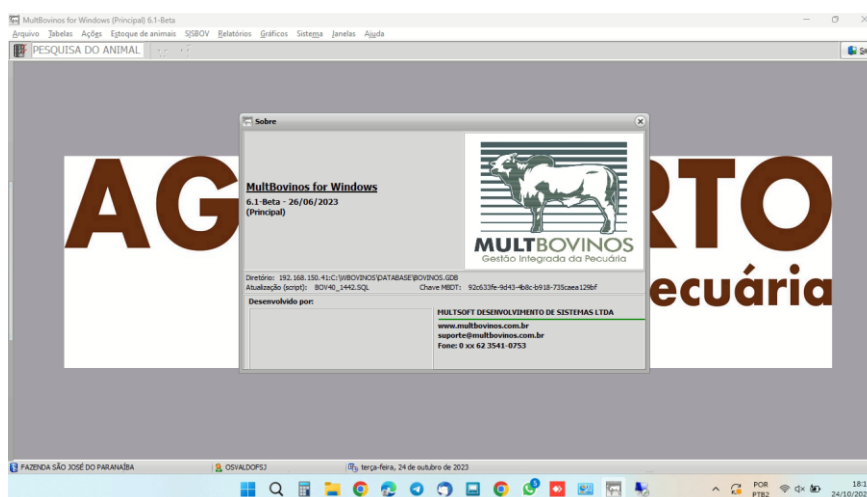
Estatísticas do Ping para 192.168.150.41:
  Pacotes: Enviados = 4891, Recebidos = 4891, Perdidos = 0 (0% de
  perda),
  Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
  Mínimo = 6ms, Máximo = 118ms, Média = 9ms
Control-C
^C
C:\Users\Fomus_SRV>
```

Fonte: o autor.

Antes da otimização do radioenlace (Figura 115) nota-se que 3 pacotes de dados foram perdidos, enquanto que após a otimização foram enviados uma quantidade muito maior de pacote e houve nenhuma perda. Além disso a média de latência para o pacote atingir o destino foi reduzida, isso prova que a otimização foi válida e atende a demanda de confiabilidade e disponibilidade do sistema pela empresa.

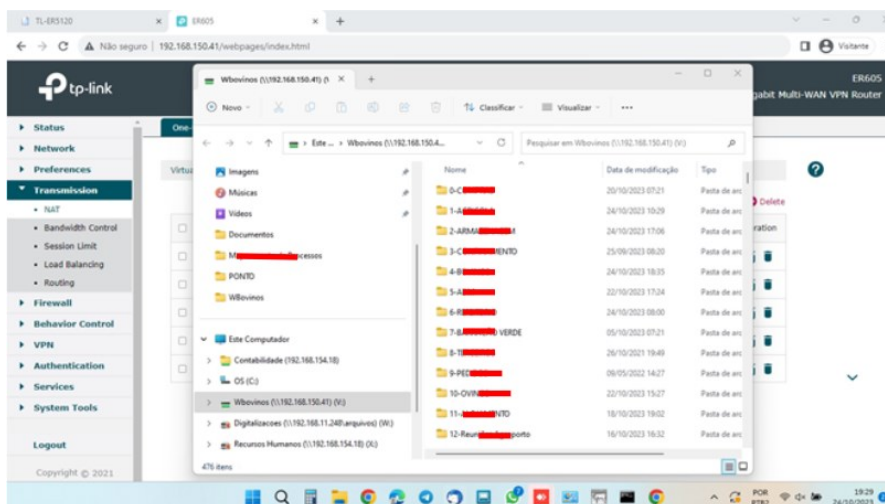
As Figuras 117 e 118 apresentam a tela principal do software Multibovinos e a pasta de armazenamento de dados respectivamente, com conexões bem sucedidas, provando a eficácia do enlace e das configurações de rede.

Figura 114 - Tela principal do software Multibovinos com usuário autenticado a partir da Fomus.



Fonte: o autor.

Figura 115 - Mapeamento de unidade de rede do servidor da Agroporto em uma estação da Fomus.

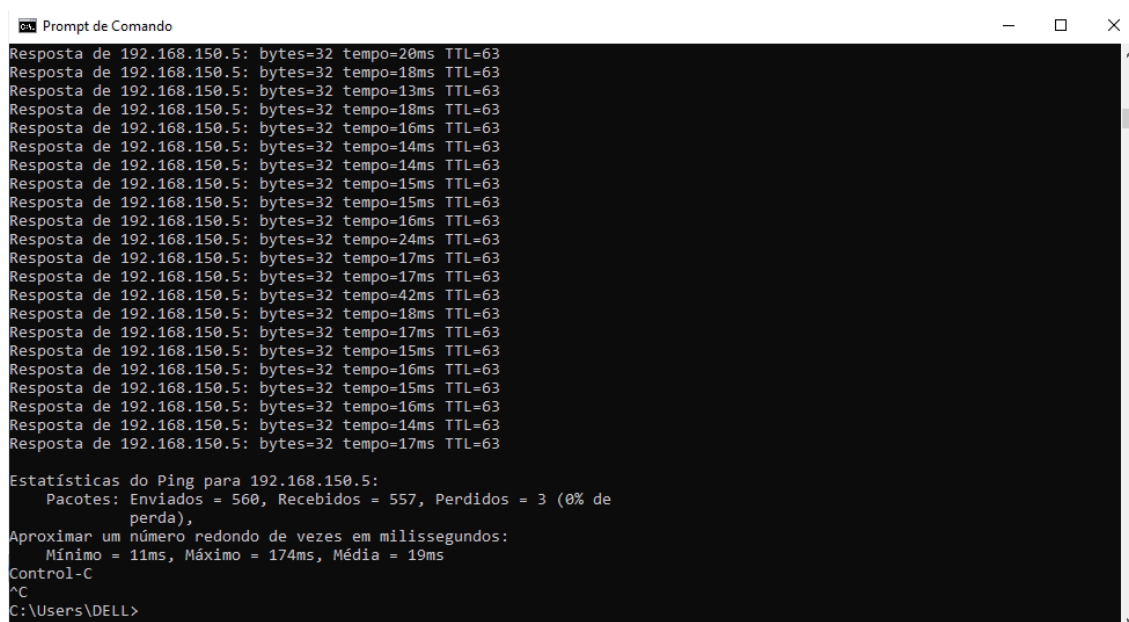


Fonte: o autor.

5.6.2 Comunicação com o servidor PABX IP

O servidor PABX IP está localizado no CPD do Center Shopping de Uberlândia, no mesmo local onde está localizado o roteador da rede de escopo 192.168.150.0/24. Esse servidor utiliza o software de telefonia IP Asterisk, o qual é um sistema antigo confiável, bem consolidado e de código aberto. O endereço IP do servidor é 192.168.150.5 e a Figura 119 apresenta o uso do ping para testar a comunicação de um dispositivo da rede Agroporto com o mesmo.

Figura 116 - Ping no servidor de telefonia a partir de estação localizado na Agroporto.



```
Prompt de Comando
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=20ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=18ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=13ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=18ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=16ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=14ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=14ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=15ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=15ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=16ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=24ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=17ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=17ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=42ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=18ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=17ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=15ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=16ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=15ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=16ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=14ms TTL=63
Resposta de 192.168.150.5: bytes=32 tempo=17ms TTL=63

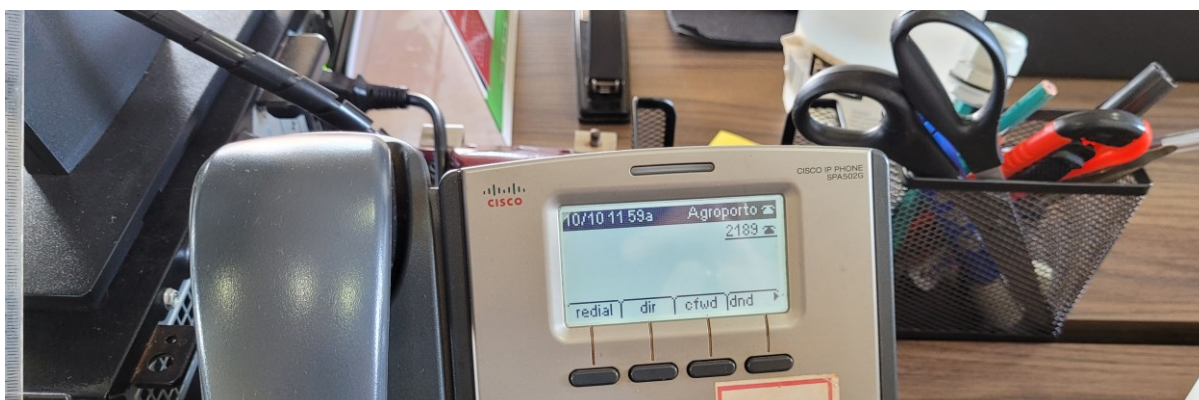
Estatísticas do Ping para 192.168.150.5:
  Pacotes: Enviados = 560, Recebidos = 557, Perdidos = 3 (0% de
perda),
Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
  Mínimo = 11ms, Máximo = 174ms, Média = 19ms
Control-C
^C
C:\Users\DELL>
```

Fonte: o autor.

Este teste foi realizado ao mesmo tempo que o da Figura 115, onde os pacotes perdidos ocorreram nas duas direções do enlace, sendo assim, a melhoria obtida pelas otimizações é refletida aqui também.

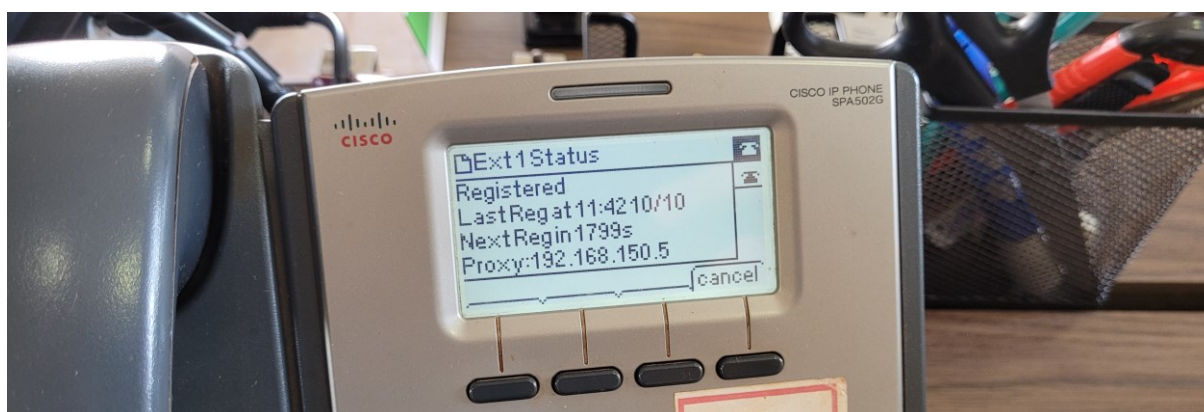
As Figuras 120 e 121 apresentam um telefone IP que é utilizado pelos funcionários da empresa Agroporto autentica com sucesso no servidor de telefonia localizado em Uberlândia, graças ao radioenlace e as configurações adequadas de rede que permitem o pacote ter conhecimento de seu destino.

Figura 117 - Ramal ativo na empresa Agroporto.



Fonte: o autor.

Figura 118 - Telefone IP registrado no servidor de telefonia localizado em Uberlândia.

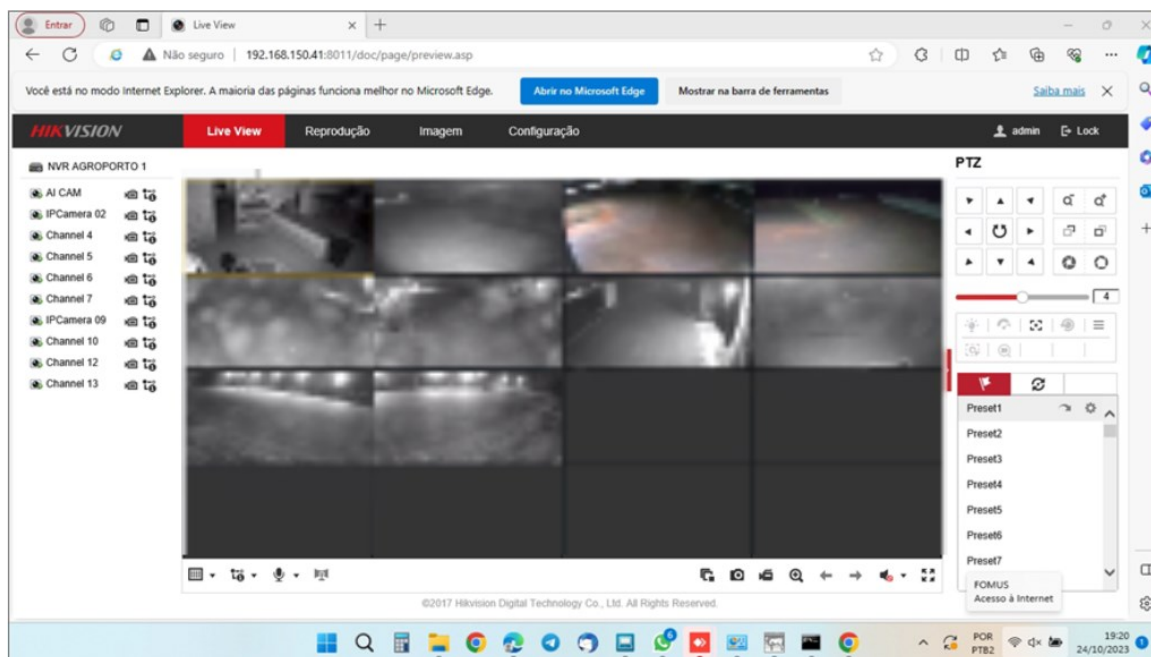


Fonte: o autor.

5.6.3 Monitoramento remoto da empresa

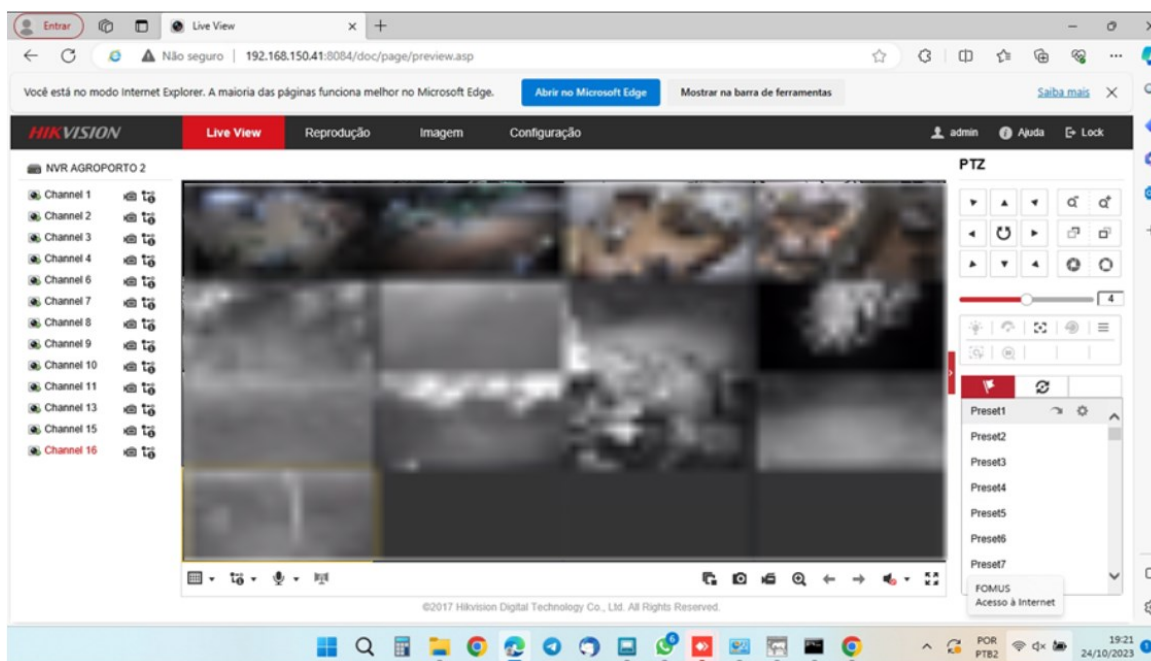
As Figuras 122 e 123 apresentam o sistema de monitoramento da empresa Agroporto sendo acessada por uma estação em Uberlândia, o qual o endereço IP a ser atingido é o mesmo visto para comunicar-se com o servidor do software Multibovinos, as portas vistas na Figura 113 são responsáveis por entregar os pacotes ao destino correto, nesse caso ao dispositivo NVR.

Figura 119 – Primeiro NVR da Agroporto visto a partir de estação em Uberlândia.



Fonte: o autor.

Figura 120 - Segundo NVR da Agroporto visto a partir de estação em Uberlândia.



Fonte: o autor.

A abertura de várias câmeras simultâneas, ou seja, vários streamings de vídeo na resolução HD e FULL HD, provam a boa capacidade de tráfego do enlace de micro-ondas em questão, uma vez que esse serviço demanda bastante recurso da rede.

5.6.4 Envio de dados de telemetria através da rede mesh

Redes *mesh* em fazendas desempenham um papel crucial na transformação digital da agricultura, proporcionando uma infraestrutura robusta para receber dados de telemetria em tempo real. Essa tecnologia cria uma malha de nós interconectados, permitindo a comunicação eficiente entre diferentes dispositivos na fazenda, como sensores agrícolas, equipamentos de monitoramento e sistemas de produção.

Com uma rede *mesh* eficiente, os agricultores podem receber alertas em tempo real sobre mudanças nas condições da plantação, identificar problemas nos equipamentos, ajustar as práticas agrícolas conforme necessário e melhorar a eficiência operacional. Essa conectividade robusta na agricultura moderna não apenas aumenta a produtividade, mas também contribui para práticas mais sustentáveis e econômicas.

As Figuras 124 e 125 mostram alguns dos equipamentos que utilizam da conexão com a rede *mesh*, a partir de enlaces de acesso espalhados pela área da empresa, para enviar dados área trabalhada, quantidade de produtos aplicados, velocidade de trabalho, tempo em marcha lenta, temperatura e etc.

Figura 121 - Maquinários agrícolas que fazem uso da rede mesh da Agroporto para telemetria.



Fonte: o autor *in loco*.

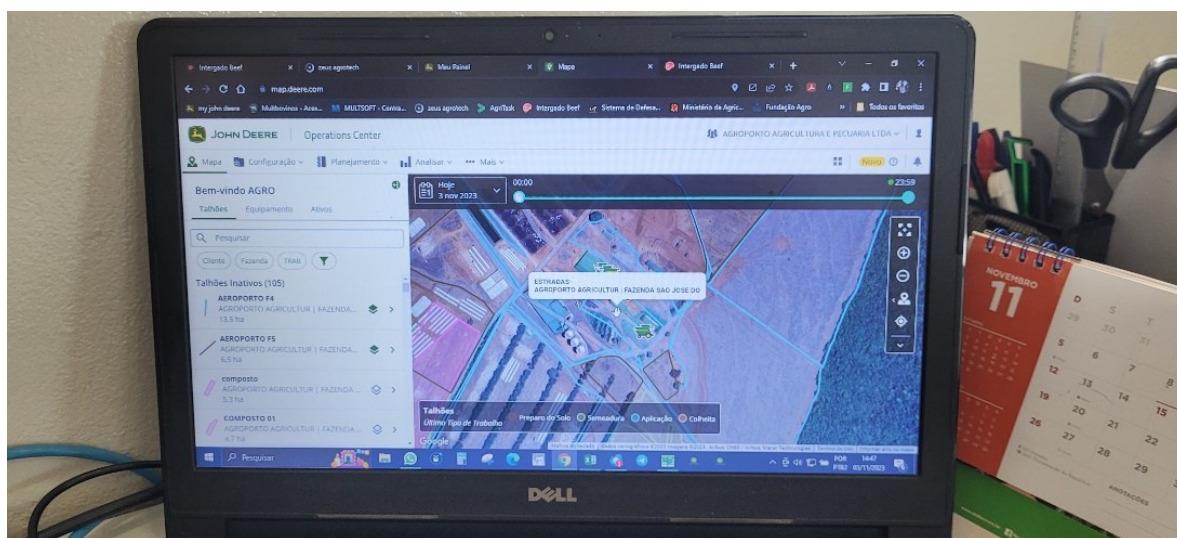
Figura 122 - Veículo misturador e distribuidor de ração que faz uso da rede mesh.



Fonte: o autor *in loco*.

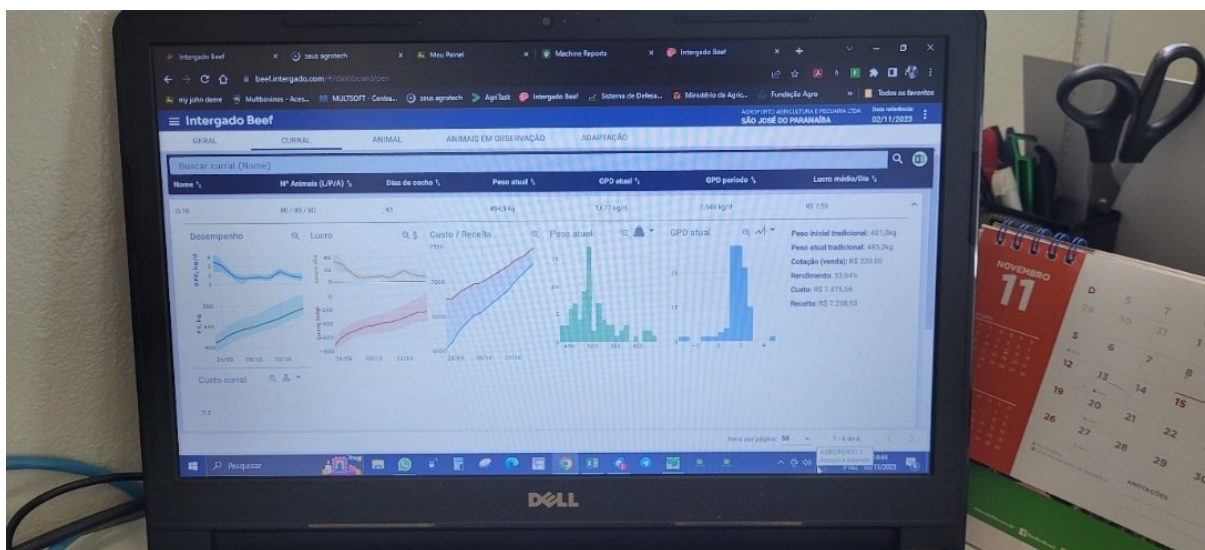
As Figuras de 126 até 128 são registros dos dados de telemetria sendo acessados em tempo real, sendo a primeira relacionada aos maquinários da empresa John Deere, enviando dados de tratores, colheitadeiras, pulverizadores e distribuidores de fertilizante, notificando inclusive defeito nas máquinas, e as duas outras figuras relacionadas a criação de gado, recebendo dados de peso e saúde do animal.

Figura 123 - Telemetria dos talhões.



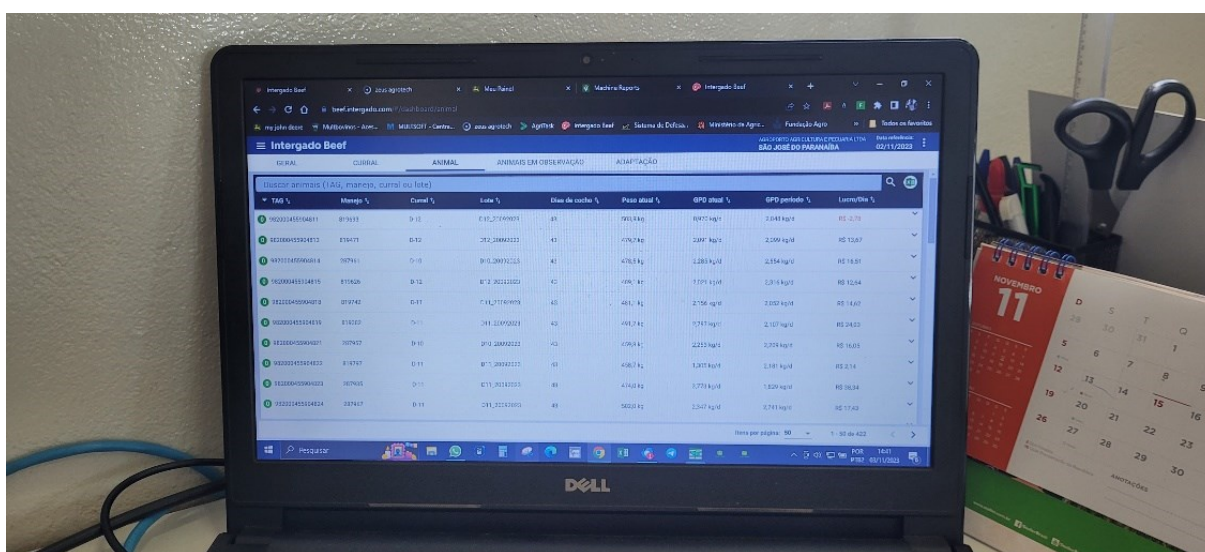
Fonte: o autor *in loco*.

Figura 124 - Dados de produção enviados pela rede mesh.



Fonte: o autor *in loco*.

Figura 125 - Telemetria do gado enviado pela rede mesh.



Fonte: o autor *in loco*.

5.7 STARLINK

A Starlink é uma ambiciosa iniciativa espacial liderada pela SpaceX, empresa de exploração espacial de Elon Musk. Trata-se de uma constelação de satélites em órbita baixa da

Terra, projetada para fornecer serviços globais de internet de alta velocidade. O objetivo é superar as limitações das infraestruturas terrestres, possibilitando conectividade em áreas remotas e oferecendo uma alternativa robusta em situações onde a conectividade tradicional é desafiadora.

Ao contrário dos tradicionais satélites de comunicação que operam em órbitas mais altas, a constelação Starlink opera em altitudes significativamente mais baixas, o que reduz a latência e aumenta a largura de banda disponível para os usuários. Isso é particularmente crucial para aplicações sensíveis à latência, como videochamadas, monitoramento e jogos online.

Essa tecnologia vem sendo uma alternativa econômica aos enlaces de micro-ondas, alguns dos acionistas da empresa foco desta monografia substituíram sua participação no enlace pela internet provida através da Starlink. Sua instalação facilitada permite que ela seja colocada em qualquer local com boa visada para o céu, não sendo necessário altos investimentos em torres de comunicação.

A Figura 129 é um registro dos equipamentos da Starlink que foram instalados para um dos acionistas, foram atingidas taxas de transferência de mais de 200 Mbps à uma latência de 50ms, o que é um valor ótimo comparado às provedoras de serviço de internet via satélite concorrentes. A empresa Agroporto está aguardando a liberação do serviço comercial da Starlink no Brasil para contratar e utilizar em conjunto com o enlace de micro-ondas atual.

Figura 126 - Starlink de acionista testada na fazenda Agroporto.



Fonte: o autor in loco.

6. CONCLUSÃO

O estudo, análise e otimização da rede WAN da empresa Agroporto e sua filial Fomus, interconectadas pelo enlace PTP, mostrou-se fundamental para a eficiência operacional e aprimoramento da comunicação em larga escala. A avaliação dos enlaces de rádio para diferentes características de propagação, através de simulações e testes reais, permitiu a identificação de áreas de melhoria e forneceram um panorama abrangente do desempenho do sistema.

A análise detalhada dos dados coletados durante os testes reais e simulações contribuiu para uma compreensão aprofundada das características de propagação, latência e capacidade da rede. Isso, por sua vez, permitiu a implementação de ajustes estratégicos para otimizar a confiabilidade e a eficiência da transmissão de dados.

Para suprir a capacidade de conexão esperada pela empresa, consultando o datasheet do rádio AF-5XHD, observou-se a necessidade de um limiar de recepção de pelo menos -65 dBm, utilizando-se modulação 64QAM e largura de banda de 80 MHz, podendo atingir aproximadamente 300 Mbps de download e upload. O rádio em operação antes da otimização estava recebendo um sinal entre -63 e -64 dBm, com uma qualidade de link abaixo de 70%, o que é considerado mediano pelo equipamento.

Após estas informações, pode-se realizar uma análise que este enlace de rádio necessitava de otimização a partir de ajustes finos do equipamento. Com esses ajustes conseguiu-se um sinal recebido de -58 dBm e uma qualidade de link de 99%, melhoria que acabou por solucionar o problema de perda de pacote que estava ocorrendo e poderia ocasionar na perda de alguma informação importante.

Neste estudo, pode-se inferir, a partir do capítulo de desenvolvimento teórico, que a consideração do fator de correção da Terra (k) é de primordial importância. Isso se deve à necessidade de empregar ambos os valores, $K_{médio}$ e $K_{mínimo}$, os quais estão associados à liberação total ou parcial da zona de Fresnel, dependendo da frequência em operação. Este fator de correção desempenha um papel significativo no dimensionamento de enlaces de rádio, indicando que a redução do valor de k torna o enlace mais desafiador. Isso ocorre porque o raio equivalente tende a diminuir, resultando no aumento da altitude do relevo topográfico e,

consequentemente, possibilitando obstruções no link de rádio, como ocorreu no enlace entre a Fomus e a fazenda Munari, o qual contribui para a degradação do sinal.

Após as otimizações o enlace operou dentro das expectativas da empresa, porém foi visto que, caso a necessidade da capacidade de tráfego venha a aumentar, o ideal seria uma intervenção na infraestrutura da torre, permitindo que a antena fosse instalada em uma altura mais elevada, como a de 54 m obtida nos cálculos teóricos e simulações, isso resultaria em um sinal com menor interferência por reflexão e consequentemente em uma maior capacidade de tráfego do radioenlace.

O estudo do comportamento para diferentes valores de frequências mostrou que para o enlace desta empresa à chuva não é um elemento muito agravante, uma vez que a frequência utilizada está abaixo de 10 GHz, onde esses efeitos são mais percebidos.

Além disso, a confiabilidade dos softwares utilizados é evidente, pois as discrepâncias entre o sinal recebido calculado pelo Pathloss e o limiar visualizado pelo software do equipamento são mínimas. Foi visto o papel fundamental que a função de modulação adaptativa tem na preservação da comunicação do link, mesmo com menor capacidade de transmissão e em uma modulação mais baixa, evitando a perda total da comunicação do enlace.

Apesar de a empresa ter necessidade de alta disponibilidade do sistema, nenhuma contramedida está sendo utilizada, seria importante avaliar o investimento no uso de diversidade de espaço, pois regiões rurais sofrem muito com fatores naturais como ventos fortes e descargas elétricas, o que poderia danificar o equipamento e tornar o sistema indisponível até a intervenção do técnico para substituição do equipamento. Ao utilizar a diversidade de espaço mais de um equipamento é utilizado para transmissão, garantindo que caso um dos equipamentos venha a falhar, o outro continue em atividade até devida manutenção ser realizada.

No Capítulo 5 foi mostrado o quão importante é o acesso a uma rede estável e de qualidade por empresas do setor agrícola, utilizando diversos recursos tecnológicos que melhoram a operação da mesma e demandam de alta taxa de troca de dados. Quando o serviço comercial da Starlink for disponibilizado no país, a integração com o enlace de micro-ondas utilizando balanceamento de carga, permitiria a distribuição do tráfego de dados de maneira eficiente entre as duas fontes de conectividade. Isso não apenas aumentaria a largura de banda disponível, mas também melhoraria a resiliência da rede. Em momentos de pico de demanda

ou possíveis interrupções em uma das tecnologias, a outra poderia assumir, garantindo uma conectividade contínua.

Além disso, essa combinação permitiria a configuração de um link de backup eficaz. Se uma das conexões enfrentasse problemas, automaticamente o tráfego poderia ser redirecionado para a outra, minimizando interrupções no serviço. Essa abordagem seria uma ótima alternativa ao investimento de diversidade de espaço no enlace atual. Vale ressaltar que caso utilizasse a Starlink sem diversidade de espaço no enlace seria necessário utilizar o serviço de VPN para garantir a conexão com a filial em Uberlândia, o qual cria um link virtual entre as redes para uso caso o enlace físico torna-se indisponível.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados e conclusões obtidos neste estudo, diversas oportunidades se destacam para trabalhos futuros, visando a contínua melhoria e adaptação da infraestrutura de rede da empresa. Algumas direções possíveis para investigações e implementações futuras incluem:

- **Integração Efetiva com a Starlink:** Com o iminente lançamento do serviço comercial da Starlink no país, seria de grande relevância explorar a integração completa dessa tecnologia com o atual enlace de micro-ondas. Investigar estratégias de balanceamento de carga e configurações para otimizar a distribuição de tráfego entre as duas fontes de conectividade, garantindo maior largura de banda e resiliência da rede;
- **Aprimoramento da Torre de Comunicação:** Considerando os cálculos teóricos e simulações que indicam uma altura ideal da torre para a instalação da antena, um trabalho futuro pode envolver a implementação física dessas alterações. Elevar a antena a uma altura mais adequada, como previsto nos estudos, poderia reduzir interferências por reflexão e aumentar significativamente a capacidade de tráfego do radioenlace;
- **Implementação de Diversidade de Espaço:** Avaliar a viabilidade e os benefícios da implementação de diversidade de espaço no enlace. A utilização

de mais de um equipamento para transmissão garantiria maior disponibilidade do sistema em regiões rurais propensas a fatores naturais adversos, como ventos fortes e descargas elétricas;

- **Análise e Implementação de Contramedidas:** Explorar medidas adicionais para garantir alta disponibilidade do sistema, como a implementação de contramedidas para lidar com fatores ambientais. Isso poderia incluir a instalação de proteções contra surtos e outras práticas para minimizar danos causados por eventos climáticos;
- **Avaliação da Necessidade de VPN:** Com a potencial integração da Starlink, uma análise aprofundada sobre a necessidade contínua do uso de VPN pode ser realizada. A implementação de um link virtual entre as redes através da VPN poderia ser reavaliada em termos de eficiência e segurança.

Estes são apenas alguns caminhos possíveis para futuras investigações. A natureza dinâmica do setor de telecomunicações e tecnologia exige uma abordagem contínua para adaptar e melhorar as redes, garantindo que permaneçam eficientes, seguras e capazes de atender às crescentes demandas operacionais da empresa.

Além dessas oportunidades de trabalhos futuros visando o cenário dessa empresa especificamente, uma área promissora a ser trabalhada, no âmbito dos projetos de radioenlaces de modo geral, seria no desenvolvimento de um software facilitador dedicado a dimensionar estes projetos. Esse software teria como objetivo simplificar o processo de planejamento e implementação, proporcionando uma interface intuitiva e amigável e poderia conter funcionalidades como:

- **Parâmetros Simplificados:** Desenvolver um sistema no qual o usuário forneça apenas alguns parâmetros essenciais, como coordenadas, frequência desejada e orçamento. O software, então, automaticamente calcularia outros dados relevantes;
- **Estimativa de Gastos:** Incorporar uma funcionalidade que estime os custos associados ao projeto, considerando não apenas os equipamentos necessários, mas também despesas de manutenção, consumo energético e possíveis atualizações futuras;

- **Visualização 3D do Enlace:** Implementar uma representação visual tridimensional do enlace proposto, permitindo que os usuários visualizem virtualmente como as ondas eletromagnéticas se propagariam na área;
- **Análise de Viabilidade Rápida:** Oferecer uma análise rápida de viabilidade do projeto, indicando potenciais desafios e sugerindo soluções com base em boas práticas e normas do setor;
- **Integração de Dados Climáticos:** Incorporar dados climáticos em tempo real ou históricos para fornecer informações sobre possíveis interferências climáticas, como chuvas intensas, efeitos de nevoeiro, etc;
- **Relatórios Detalhados:** Gerar relatórios detalhados que incluam não apenas as especificações técnicas do enlace, mas também considerações econômicas, impactos ambientais e outros fatores relevantes.

O desenvolvimento de tal software seria uma iniciativa significativa, simplificando e agilizando a fase de planejamento de projetos de radioenlace. Além disso, contribuiria para a disseminação de boas práticas e a padronização na implementação desses sistemas, beneficiando tanto profissionais experientes quanto aqueles que estão ingressando na área.

REFERÊNCIAS

- (1) ISTED, G. A. Guglielmo Marconi and the History of Radio – Part I. Disponível em: <<https://themarconifamily.pbworks.com/f/p45.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- (2) HISTÓRIA DA TELEVISÃO. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/espacodoconhecimento/historia-da-televisao/>>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- (3) SPINOLA, S., ROMANI, C. Fundamentos da Telefonia IP. Disponível em: <https://www.ip10.com.br/docs/Fundamentos_da_Telefonia_IP.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- (4) TANENBAUM, A. S. Redes de Computadores (5ª ed.). São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2011.
- (5) ROBERTO LANDELL DE MOURA. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Roberto_Landell_de_Moura>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- (6) PADRE LANDELL DE MOURA. Disponível em: <<https://pu2spn.no.comunidades.net/padre-landell-de-moura>>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- (7) HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DA TELECOMUNICAÇÃO NO BRASIL. Disponível em: <<https://www.coladaweb.com/geografia-do-brasil/as-telecomunicacoes>>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- (8) ABOUT INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- (9) WHAT DOES ITU DO. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/about/Pages/whatwedo.aspx>>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- (10) MIYOSHI, E.M. e SANCHES, C. A. Projetos de Sistemas Rádio. Érica. São Paulo, Brasil. 2002.
- (11) 15 DIFFERENCE BETWEEN LAN, MAN AND WAN. Disponível em: <<https://vivadifferences.com/lan-vs-man-vs-wan/>>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- (12) KUROSE, JAMES F. e ROSS, KEITH W. Redes de Computadores e a Internet: uma abordagem top-down. 6. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- (13) IP TELEPHONY SOLUTIONS. Disponível em: <<https://ltech.sa/ip-telephony-solutions/>>. Acesso em: 30 nov. 2021.
- (14) FOROUZAN, B. A. Comunicação de dados e redes de computadores. 4. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2008.

- (15) NASCIMENTO, J. Telecomunicações. 1. Ed. São Paulo: MAKRON Books, 1992.
- (16) SILVA, G. e BARRADAS, O. Sistemas Radiovisibilidade. 2. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1978.
- (17) O QUE SÃO AS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/o-que-sao-ondas-eletromagneticas.htm>>. Acesso em: 7 dez. 2021.
- (18) GROUND WAVE PROPAGATION. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Ground-wave-propagation_fig1_325570202>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- (19) SKIP AREA. Disponível em: <<https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803100510216;jsessionid=B4DA26077733D5747AF80BFD74EF57C0>>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- (20) PROPAGACIÓN POR ONDA IONOSFÉRICA. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Propagaci%C3%B3n_por_onda_ionosf%C3%A9rica.svg>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- (21) PORQUE AS ONDAS DE RÁDIO TÊM ESSE NOME. Disponível em: <<https://pt.quora.com/Por-que-as-ondas-de-r%C3%A1dio-tem-esse-nome>>. Acesso em: 21 dez. 2021.
- (22) PRUDENTE MELO, M. V. Projeto de Radioenlace ponto a ponto utilizando frequência de 2.4 GHz para comunicação de dados. Campina Grande: UFCG.
- (23) ZONA DE FRESNEL. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Zona_de_Fresnel>. Acesso em: 2 jan. 2022.
- (24) ITU-R V.574: Use of the decibel and the neper in telecommunications. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.574-5-201508-I!!PDF-E.pdf>.
- (25) ITU-R P.530: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/en>>.
- (26) ITU-R P.837: Characteristics of precipitation for propagation modelling. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.837/en>>.
- (27) BRITO PIAU, D. Projeto de Dimensionamento de Enlace de Rádio Associado a Atenuações Devido à Chuva Utilizando Celplan e Pathloss. Uberlândia: UFU, 2013.
- (28) ITU-R P.838: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf>.

- (29) Disponível em: <<https://thenetworkinstallers.com/es/blog/conexi%C3%B3n-a-internet-punto-a-punto/>>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- (30) ITU-R P.341: The concept of transmission loss for radio links. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.341/en>>.
- (31) PathLoss. Disponível em: <<https://www.pathloss.com/>>.
- (32) SRTM. Disponível em:< <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>>. Acesso em: 24 set. 2022.
- (33) Arquivos SRTM. Disponível em: <<http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> >.
- (34) Sistemas Radioenlaces Digitais. Disponível em: <<http://www.cesarkallas.net/arquivos/faculdade-pos/TP304-sistemas-radioenlaces-digitais/SRD-2V2011PG.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- (35) USE OF THE DECIBEL AND THE NEPER IN TELECOMMUNICATIONS. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.574-4-200005-S!!PDF-E.pdf>.
- (36) Antenas. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003_1/miguel/Capitulo4.htm>. Acesso em: 18 abr. 2023.
- (37) Cabo de par trançado. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Cabo_de_par_tran%C3%A7ado>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- (38) Cat6 vs Cat7 vs Cat8 What is the difference and specifications. Disponível em: <<https://www.hdcabling.co.za/cat6-vs-cat7-vs-cat8-what-is-the-difference-and-specifications/>>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- (39) Técnicas de Modulação. Disponível em: < <https://slideplayer.com.br/slide/49892/>>. Acesso em: 17 jun. 2023.
- (40) Sistema de Transmissão de Dados. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=SSX1RLSQ5w4>>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- (41) Inside Wireless: modulação QAM. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=IbUflaeJcU8&list=PLii-eQuaf57ocpSGH6NR8IKtJvB9mb81h&index=1>>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- (42) MCS Index. Disponível em: <<https://mcsindex.com/>>.
- (43) AirFiber 5XHD Datasheet. Disponível em: <https://dl.ubnt.com/datasheets/airfiber/airFiber_5XHD_DS.pdf>.

(44) ALGcom UHPX-5800-XX-XX-DP Datasheet. Disponível em:
<<https://loja.algcom.com.br/antena-ultra-high-performance-full-band-extreme-58-ghz-35-dbi-120-cm-uhpx-5800-35-12-dp/p>>.

(45) Rocket Dish Datasheet. Disponível em:
<https://dl.ubnt.com/datasheets/rocketdish/rd_ds_web.pdf>.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DAS ANTENAS

```

% Solicitando variáveis de entrada ao usuário
f = input('Frequência de transmissão (GHz): ');
d = input('Distância total do enlace (km): ');
d1 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): ');
d2 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): ');
hA = input('Altitude da estação A (m): ');
hB = input('Altitude da estação B (m): ');
h1 = input('Altura da antena A, tomada como referência (m): ');
hpc = input('Altitude do ponto crítico (m): ');
MC = input('Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): ');
MS = input('Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): ');

% Obtendo Valor de Kmín
Kmin = 157 / (144 + (2670/d));

% Padronização unidade de medida
f = f * 1e9;
d = d * 1e3;
d1 = d1 * 1e3;
d2 = d2 * 1e3;

% Calculando comprimento de onda (lambda)
c = 3e8; % velocidade da luz em m/s
lambda = c / f;

% 100% Raio de Fresnel (RF)
RF = sqrt((lambda * d1 * d2) / d);

% 60% Raio de Fresnel (RF_linha)
RF_linha = 0.6 * RF;

% Calculando valores para K = 4/3
Hm = (d1 * d2) / (4/3 * 12.74 * 1e6);
HC = RF + Hm;

% Calculando valores para K = Kmínimo
Hm_linha = (d1 * d2) / (Kmin * 12.74 * 1e6);
HC_linha = RF_linha + Hm_linha;

% Calculando altura da Antena B para K = 4/3
h2 = (d * (hpc + HC + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 - hB)) / d1;

% Calculando altura da Antena B para K = Kmínimo
h2_linha = (d * (hpc + HC_linha + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 - hB)) /
d1;

% Exibindo os resultados
fprintf('Altura da Antena B para K = 4/3: %.2f m\n', h2);
fprintf('Altura da Antena B para K = mínimo: %.2f m\n', h2_linha);

```

APÊNDICE B – CÓDIGO DO APÊNDICE A APRIMORADO PARA ESTUDO DE INTERVALO DE FREQUÊNCIAS

```

% Solicitando variáveis de entrada ao usuário
f_inicial = input('Frequência de transmissão inicial (GHz): ');
f_final = input('Frequência de transmissão final (GHz): ');
f_passo = 0.005; % Intervalo de frequência de 5 MHz
d = input('Distância total do enlace (km): ');
d1 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): ');
d2 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): ');
hA = input('Altitude da estação A (m): ');
hB = input('Altitude da estação B (m): ');
h1 = input('Altura da antena A, tomada como referência (m): ');
hpc = input('Altitude do ponto crítico (m): ');
MC = input('Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): ');
MS = input('Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): ');

% Obtendo Valor de Kmín
Kmin = 157 / (144 + (2670/d));

% Padronização unidade de medida
d = d * 1e3;
d1 = d1 * 1e3;
d2 = d2 * 1e3;

% Inicializando vetores para armazenar resultados
frequencias = f_inicial:f_passo:f_final;
h2_valores_4_3 = zeros(size(frequencias));
h2_valores_min = zeros(size(frequencias));

% Loop sobre as frequências
for i = 1:length(frequencias)
    f = frequencias(i);

    % Restante do código permanece o mesmo, exceto pelos cálculos dentro do
loop

    % Calculando comprimento de onda (lambda)
    c = 3e8; % velocidade da luz em m/s
    lambda = c / (f * 1e9); % Convertendo a frequência para Hz

    % 100% Raio de Fresnel (RF)
    RF = sqrt((lambda * d1 * d2) / d);

    % 60% Raio de Fresnel (RF_linha)
    RF_linha = 0.6 * RF;

    % Calculando valores para K = 4/3
    Hm = (d1 * d2) / ((4/3) * 12.74 * 1e6);
    HC = RF + Hm;

    % Calculando valores para K = Kmínimo
    Hm_linha = (d1 * d2) / (Kmin * 12.74 * 1e6);
    HC_linha = RF_linha + Hm_linha;

```



```

        % Calculando altura da Antena B para K = 4/3
        h2 = (d * (hpc + HC + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 - hB)) / d1;

        % Calculando altura da Antena B para K = Kmínimo
        h2_linha = (d * (hpc + HC_linha + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 - hB)) /
d1;

        % Armazenando os resultados nos vetores
        h2_valores_4_3(i) = h2;
        h2_valores_min(i) = h2_linha;
    end

    % Plotando os resultados
    figure;
    plot(frequencias, h2_valores_4_3, 'b-', 'LineWidth', 2);
    hold on;
    plot(frequencias, h2_valores_min, 'r-', 'LineWidth', 2);
    title('Altura da Antena B em Função da Frequência');
    xlabel('Frequência (GHz)');
    ylabel('Altura da Antena B (m)');
    legend('K = 4/3', 'K = mínimo');
    grid on;
    hold off;

```

APÊNDICE C – CÓDIGO DO APÊNDICE A APRIMORADO PARA ESTUDO DAS ATENUAÇÕES NA PROPAGAÇÃO E ESPAÇO LIVRE

```

% Solicitando variáveis de entrada ao usuário

%Universais para estimativa da altura das antenas
fprintf('Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das
Antenas \n');
f = input('Frequência de transmissão (GHz): ');
D = input('Distância total do enlace (km): ');
d1 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): ');
d2 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): ');
hA = input('Altitude da estação A (m): ');
hB = input('Altitude da estação B (m): ');
h1 = input('Altura da antena A, tomada como referência (m): ');
hpc = input('Altitude do ponto crítico (m): ');
MC = input('Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): ');
MS = input('Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): ');

% Obtendo Valor de Kmín
Kmin = 157 / (144 + (2670/d));

% Padronização unidade de medida
f = f * 1e9;
D = D * 1e3;
d1 = d1 * 1e3;
d2 = d2 * 1e3;

```

```

% Calculando comprimento de onda (lambda)
c = 3e8; % velocidade da luz em m/s
lambda = c / f;

% 100% Raio de Fresnel (RF)
RF = sqrt((lambda * d1 * d2) / D);

% 60% Raio de Fresnel (RF_linha)
RF_linha = 0.6 * RF;

% Calculando valores para K = 4/3
Hm = (d1 * d2) / (4/3 * 12.74 * 1e6);
HC = RF + Hm;

% Calculando valores para K = Kmínimo
Hm_linha = (d1 * d2) / (Kmin * 12.74 * 1e6);
HC_linha = RF_linha + Hm_linha;

% Calculando altura da Antena B para K = 4/3
h2 = (D * (hpc + HC + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 - hB)) / d1;

% Calculando altura da Antena B para K = Kmínimo
h2_linha_calculado = (D * (hpc + HC_linha + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 -
hB)) / d1;

while true
    % Solicita ao usuário escolher entre usar um valor calculado da altura
da antena (1) ou inserir um valor manual (2)
    choice = input('\nEscolha: \n[1] Para usar o valor calculado da antena
\n[2] - Para inserir um valor manual: ');

    if choice == 1
        h2_linha = h2_linha_calculado;
        break; % Sai do loop enquanto a escolha for válida
    elseif choice == 2
        h2_linha = input('Digite o valor da altura da antena de recepção:
');
        break; % Sai do loop enquanto a escolha for válida
    else
        fprintf('Escolha inválida. Por favor, digite 1 ou 2.\n');
    end
end

%Reajustando unidades de medidas para cálculo de perdas
f = f * 1e-9;
D = D * 1e-3;
h1_mar = hA + h1;
h2_mar = hB + h2_linha;

%Especificas para estudo das perdas de percurso
fprintf('\n Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
\n');
R_001 = input('Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): ');
K_V = input('Coeficiente K_V para polarização vertical: ');
K_H = input('Coeficiente K_H para polarização horizontal: ');
alpha_V = input('Coeficiente alpha_V para polarização vertical: ');

```

```

alpha_H = input('Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: ');
C_lat = input('Coeficiente de Latitude: ');
C_lon = -3; %Valor em dB para américa do sul
Co = input('Valor do fator Co: ');
pL = input('Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é
inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): ');

% Calculando a propagação e perda no espaço livre
L_bf = 92.45 + 20 * log10(D) + 20 * log10(f);

% Calculando as perdas devido às chuvas
d0 = 35 * exp(-0.015*R_001);
r = 1 / (1+(D/d0));
D_eff = r * D;
Gama_rv = K_V * (R_001^alpha_V);
Gama_rh = K_H * (R_001^alpha_H);
Gama_rc = (Gama_rv + Gama_rh) / 2;
g_elip = (Gama_rv - Gama_rh) / (Gama_rv + Gama_rh);
Gama_re = g_elip * Gama_rc + (1 - g_elip) * Gama_rv;

%Atenuação por chuva para 0.01% do tempo
%Para polarização horizontal
A_001_h = Gama_rh * D_eff;
%Para polarização vertical
A_001_v = Gama_rv * D_eff;
%Para polarização circular
A_001_c = Gama_rc * D_eff;
%Para polarização elíptica
A_001_e = Gama_re * D_eff;

% Pedindo ao usuário a Atenuação Devido à Absorção Atmosférica
Gama_o = input('Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): ');
Gama_w = input('Valor de absorção devido ao vapor d`água (dB/Km): ');
A_ab = (Gama_o + Gama_w) * D;

% Calculando a probabilidade de Desvanecimento Plano
E_p = (1000*atan(h1_mar - h2_mar)) / (1000*D); %Inclinação do Enlace em mrad
K = 5e-7 * 10^(-0.1*(Co - C_lat - C_lon)) * pL^1.5;
P_dp = K * D^3.6 * f^0.89 * (1 + abs(E_p))^-1.4;

% Calculando a Probabilidade Desvanecimento Seletivo
P_ds = 1 - exp(-0.2*((P_dp/100)^0.75));

% Calculando a Atenuação Total do Enlace Prevista no Espaço Livre
%Para polarização horizontal
Atenuacao_Total_h = L_bf + A_001_h + A_ab;
%Para polarização vertical
Atenuacao_Total_v = L_bf + A_001_v + A_ab;
%Para polarização circular
Atenuacao_Total_c = L_bf + A_001_c + A_ab;
%Para polarização elíptica
Atenuacao_Total_e = L_bf + A_001_e + A_ab;

% Exibindo os resultados
fprintf('\n RESULTADOS OBTIDOS \n')
fprintf('Altura Esperada das Antenas para Transmissão em Visada Direta \n');

```

```

fprintf('Altura da Antena B para K = 4/3: %.2f m\n', h2);
fprintf('Altura da Antena B para K = mínimo: %.2f m', h2_linha_calculado);
if h2_linha_calculado ~= h2_linha
    fprintf('\nAltura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de
atenuações: %.2f m\n\n', h2_linha);
else
    fprintf('\n\n\n');
end

fprintf('Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo: \n');
fprintf('Polarização Horizontal: %.2f dB \n', A_001_h);
fprintf('Polarização Vertical: %.2f dB \n', A_001_v);
fprintf('Polarização Circular: %.2f dB \n', A_001_c);
fprintf('Polarização Elíptica: %.2f dB \n', A_001_e);
fprintf('\n Probabilidade de Desvanecimento: \n');
fprintf('Plano: %.2f %% \n', P_dp);
fprintf('Seletivo: %.2f %% \n', P_ds);
fprintf('\n Atenuação Total do Enlace Prevista para: \n');
fprintf('Polarização Horizontal: %.2f dB\n', Atenuacao_Total_h);
fprintf('Polarização Vertical: %.2f dB\n', Atenuacao_Total_v);
fprintf('Polarização Circular: %.2f dB\n', Atenuacao_Total_c);
fprintf('Polarização Elíptica: %.2f dB\n', Atenuacao_Total_e);

```

APÊNDICE D – CÓDIGO DO APÊNDICE C APRIMORADO PARA ESTUDO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE

```

% Solicitando variáveis de entrada ao usuário

%Universais para estimativa da altura das antenas
fprintf('Insira os Valores de Entrada para Dimensionamento das Alturas das
Antenas \n');
f = input('Frequência de transmissão (GHz): ');
D = input('Distância total do enlace (km): ');
d1 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação A (km): ');
d2 = input('Distância do obstáculo de maior altitude à estação B (km): ');
hA = input('Altitude da estação A (m): ');
hB = input('Altitude da estação B (m): ');
h1 = input('Altura da antena A, tomada como referência (m): ');
hpc = input('Altitude do ponto crítico (m): ');
MC = input('Margem de crescimento de árvores no ponto crítico (m): ');
MS = input('Margem de segurança devido à precisão das medidas (m): ');

% Obtendo Valor de Kmín
Kmin = 157 / (144 + (2670/d));

% Padronização unidade de medida
f = f * 1e9;
D = D * 1e3;
d1 = d1 * 1e3;
d2 = d2 * 1e3;

%DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DAS ANTENAS SEGUINDO CRITERIOS DE VISIBILIDADE%

% Calculando comprimento de onda (lambda)
c = 3e8; % velocidade da luz em m/s

```

```

lambda = c / f;

% 100% Raio de Fresnel (RF)
RF = sqrt((lambda * d1 * d2) / D);

% 60% Raio de Fresnel (RF_linha)
RF_linha = 0.6 * RF;

% Calculando valores para K = 4/3
Hm = (d1 * d2) / (4/3 * 12.74 * 1e6);
HC = RF + Hm;

% Calculando valores para K = Kmínimo
Hm_linha = (d1 * d2) / (Kmin * 12.74 * 1e6);
HC_linha = RF_linha + Hm_linha;

% Calculando altura da Antena B para K = 4/3
h2 = (D * (hpc + HC + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 - hB)) / d1;

% Calculando altura da Antena B para K = Kmínimo
h2_linha_calculado = (D * (hpc + HC_linha + MC + MS - hB) - d2 * (hA + h1 -
hB)) / d1;

while true
    % Solicita ao usuário escolher entre usar um valor calculado da altura
da antena (1) ou inserir um valor manual (2)
    choice = input('\nEscolha: \n[1] Para usar o valor calculado da antena
\n[2] - Para inserir um valor manual: ');

    if choice == 1
        h2_linha = h2_linha_calculado;
        break; % Sai do loop enquanto a escolha for válida
    elseif choice == 2
        h2_linha = input('Digite o valor da altura da antena de recepção:
');
        break; % Sai do loop enquanto a escolha for válida
    else
        fprintf('Escolha inválida. Por favor, digite 1 ou 2.\n');
    end
end

%Reajustando unidades de medidas para cálculo de perdas
f = f * 1e-9;
D = D * 1e-3;
h1_mar = hA + h1;
h2_mar = hB + h2_linha;

%Especificas para estudo das perdas de percurso
fprintf('\n Insira os Valores de Entrada para Estimar a Atenuação Total
\n');
R_001 = input('Taxa pluviométrica para 0.01% do tempo (mm/h): ');
K_V = input('Coeficiente K_V para polarização vertical: ');
K_H = input('Coeficiente K_H para polarização horizontal: ');
alpha_V = input('Coeficiente alpha_V para polarização vertical: ');
alpha_H = input('Coeficiente alpha_H para polarização horizontal: ');
C_lat = input('Coeficiente de Latitude: ');

```

```

C_lon = -3; %Valor em dB para América do Sul
Co = input('Valor do fator Co: ');
pL = input('Percentual de tempo em que o gradiente do índice de refração é inferior a -100N/Km no pior mês do ano (pL): ');

% CALCULANDO A ATENUAÇÃO TOTAL NO ESPAÇO LIVRE%

%Perda no espaço livre
L_bf = 92.45 + 20 * log10(D) + 20 * log10(f);

% Calculando as perdas devido às chuvas
d0 = 35 * exp(-0.015*R_001);
r = 1 / (1+(D/d0));
D_eff = r * D;
Gama_rv = K_V * (R_001^alpha_V);
Gama_rh = K_H * (R_001^alpha_H);
Gama_rc = (Gama_rv + Gama_rh) / 2;
g_elip = (Gama_rv - Gama_rh) / (Gama_rv + Gama_rh);
Gama_re = g_elip * Gama_rc + (1 - g_elip) * Gama_rv;

%Atenuação por chuva para 0.01% do tempo
%Para polarização horizontal
A_001_h = Gama_rh * D_eff;
%Para polarização vertical
A_001_v = Gama_rv * D_eff;
%Para polarização circular
A_001_c = Gama_rc * D_eff;
%Para polarização elíptica
A_001_e = Gama_re * D_eff;

% Pedindo ao usuário a Atenuação Devido à Absorção Atmosférica
Gama_o = input('Valor de absorção devido ao oxigênio (dB/Km): ');
Gama_w = input('Valor de absorção devido ao vapor d`água (dB/Km): ');
A_ab = (Gama_o + Gama_w) * D;

% Calculando a probabilidade de Desvanecimento Plano
E_p = (1000*atan(h1_mar - h2_mar)) / (1000*D); %Inclinação do Enlace em mrad
K = 5e-7 * 10^(-0.1*(Co - C_lat - C_lon)) * pL^1.5;
P_dp = K * D^3.6 * f^0.89 * (1 + abs(E_p))^-1.4;

% Calculando a Probabilidade Desvanecimento Seletivo
P_ds = 1 - exp(-0.2*((P_dp/100)^0.75));

Gt = input('Insira o valor do ganho da antena da estação A em dBi: ');
Gr = input('Insira o valor do ganho da antena da estação B em dBi: ');

% Calculando a Atenuação Total do Enlace Prevista
Atenuacao_Total = L_bf + A_ab - (Gt + Gr);

%CÁLCULO DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE%

Pt = input('Insira o valor da potência de transmissão na saída do rádio em dBm: ');

%Nível de recepção nominal
P_RN = Pt - Atenuacao_Total;

```

```

%Margem Líquida do Enlace
S_rx = input('Insira o valor de limiar de recepção do equipamento de rádio
em dBm: ');
S_rx = S_rx * (-1);
M = P_RN - S_rx;

% Porcentagem de Indisponibilidade devido à chuva
%Para polarização horizontal
Pr_h = 10^((-6.34) + sqrt(40.29 - (23.25*log((8.33*M)/A_001_h))));
%Para polarização vertical
Pr_v = 10^((-6.34) + sqrt(40.29 - (23.25*log((8.33*M)/A_001_v))));
%Para polarização circular
Pr_c = 10^((-6.34) + sqrt(40.29 - (23.25*log((8.33*M)/A_001_c))));
%Para polarização elíptica
Pr_e = 10^((-6.34) + sqrt(40.29 - (23.25*log((8.33*M)/A_001_e))));

%Indisponibilidade devido ao desvanecimento plano
Pw = (P_dp/100) * 10^(-M/10);

%Indisponibilidade devido ao desvanecimento seletivo
Wm = 30; Wnm = 30; Bm = 25; Bnm = 20; tau_rm = 6.3; tau_rnm = 6.3;
tau_m = 0.7 * (D/50)^1.3;
Ps = 2.15 * P_ds * ((Wm * 10^(-Bm/20)) * ((tau_m^2)/tau_rm)) + (Wnm * 10^(-
Bnm/20) * ((tau_m^2)/tau_rnm));

%Probabilidade total de ocorrência de SES
Pt_ses = Pw + Ps;

%Tempo de interrupção do sistema no pior mês em segundos
Ti = (Pt_ses * 30 * 24 * 60 * 60)/100;

%Indisponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano e Seletivo
I_dp_ds = Pt_ses * 0.3;

%INDISPONIBILIDADE TOTAL%
%Para polarização horizontal
It_h = Pr_h + I_dp_ds;
%Para polarização vertical
It_v = Pr_v + I_dp_ds;
%Para polarização circular
It_c = Pr_c + I_dp_ds;
%Para polarização elíptica
It_e = Pr_e + I_dp_ds;

%Tempo de indisponibilidade no ano
%Para polarização horizontal
Tind_h = (It_h * 365 * 24 * 60)/100;
%Para polarização vertical
Tind_v = (It_v * 365 * 24 * 60)/100;
%Para polarização circular
Tind_c = (It_c * 365 * 24 * 60)/100;
%Para polarização elíptica
Tind_e = (It_e * 365 * 24 * 60)/100;

%DISPONIBILIDADES DO SISTEMA

```

```

Pr_h = 100 - Pr_h;
Pr_v = 100 - Pr_v;
Pr_c = 100 - Pr_c;
Pr_e = 100 - Pr_e;
Pw = 100 - Pw;
Ps = 100 - Ps;
I_dp_ds = 100 - I_dp_ds;
It_h = 100 - It_h;
It_v = 100 - It_v;
It_c = 100 - It_c;
It_e = 100 - It_e;

% Exibindo os resultados
fprintf('\nRESULTADOS OBTIDOS \n\n')
fprintf('DIMENSIONAMENTO DA ALTURA DA ANTENA:\n');
fprintf('Altura da Antena B para K = 4/3: %.2f m\n', h2);
fprintf('Altura da Antena B para K = mínimo: %.2f m', h2_linha_calculado);
if h2_linha_calculado ~= h2_linha
    fprintf('\nAltura da Antena B para escolhida e utilizada nos cálculos de
atenuações: %.2f m\n\n', h2_linha);
else
    fprintf('\n\n\n');
end

fprintf('ATENUAÇÕES NO ESPAÇO LIVRE\n')
fprintf('Atenuação causada pela chuva para 0.01% do tempo: \n');
fprintf('    Polarização Horizontal: %.6f dB \n', A_001_h);
fprintf('    Polarização Vertical: %.6f dB \n', A_001_v);
fprintf('    Polarização Circular: %.6f dB \n', A_001_c);
fprintf('    Polarização Elíptica: %.6f dB \n', A_001_e);
fprintf('\nProbabilidade de Desvanecimento: \n');
fprintf('    Plano: %.6f %% \n', P_dp);
fprintf('    Seletivo: %.6f %% \n', P_ds);
fprintf('\nAtenuação Total do Enlace Prevista: %.6f dB \n',
Atenuacao_Total);
fprintf('\nPotência do Sinal Recebido Previsto: %.6f dB \n', P_RN);

fprintf('\nINDISPONIBILIDADE DO SISTEMA\n');
fprintf('Probabilidade de Disponibilidade devido atenuação da chuva para:
\n');
fprintf('    Polarização Horizontal: %.6f %% \n', Pr_h);
fprintf('    Polarização Vertical: %.6f %% \n', Pr_v);
fprintf('    Polarização Circular: %.6f %% \n', Pr_c);
fprintf('    Polarização Elíptica: %.6f %% \n', Pr_e);
fprintf('\nProbabilidade de Disponibilidade devido ao desvanecimento plano:
%.6f %% \n', Pw);
fprintf('\nProbabilidade de Disponibilidade devido ao desvanecimento
seletivo: %.6f %% \n', Ps);
fprintf('\nProbabilidade total de ocorrência de SES: %.6f %% \n', Pt_ses);
fprintf('\nTempo de interrupção do sistema no pior mês: %.6f s \n', Ti);
fprintf('\nDisponibilidade Devido ao Desvanecimento Plano e Seletivo: %.6f
%% \n', I_dp_ds);

fprintf('\n\nDISPONIBILIDADE TOTAL\n');
fprintf('    Polarização Horizontal: %.6f %% \n', It_h);
fprintf('    Polarização Vertical: %.6f %% \n', It_v);

```



```
fprintf('      Polarização Circular: %.6f %% \n', It_c);  
fprintf('      Polarização Elíptica: %.6f %% \n', It_e);  
  
fprintf('\n\nTEMPO DE INDISPONIBILIDADE NO ANO\n');  
fprintf('      Polarização Horizontal: %.6f min \n', Tind_h);  
fprintf('      Polarização Vertical: %.6f min \n', Tind_v);  
fprintf('      Polarização Circular: %.6f min \n', Tind_c);  
fprintf('      Polarização Elíptica: %.6f min \n', Tind_e);
```

APÊNDICE E – DIAGRAMA DE REDE

