

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO ESTIGARRIBIA POMPILIO

ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA E DEGRADAÇÃO DO SINAL RADIOELÉTRICO
DEVIDO AS CHUVAS EM UM SISTEMA PONTO-MULTIPONTO EM REGIÕES
COSTEIRAS: ESTUDO DE CASO PARA O MUNICÍPIO DE PONTAL DO PARANÁ.

CURITIBA

2024

PEDRO ESTIGARRIBIA POMPILIO

ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA E DEGRADAÇÃO DO SINAL RADIOELÉTRICO
DEVIDO AS CHUVAS EM UM SISTEMA PONTO-MULTIPONTO EM REGIÕES
COSTEIRAS: ESTUDO DE CASO PARA O MUNICÍPIO DE PONTAL DO PARANÁ.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ph.D. Horacio Tertuliano Filho

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Pompilio, Pedro Estigarribia

Análise da interferência e degradação do sinal radioelétrico devido as chuvas em um sistema ponto-multiponto em regiões costeiras: estudo de caso para o município de Pontal do Paraná / Pedro Estigarribia Pompilio. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Horacio Tertuliano Filho

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Telefone celular. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Tertuliano Filho, Horacio. IV . Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PEDRO ESTIGARRIBIA POMPILIO** intitulada: **Análise da interferência e degradação do sinal radioelétrico devido as chuvas em um sistema ponto-multiponto em regiões costeiras: estudo de caso para o município de Pontal do Paraná.**, sob orientação do Prof. Dr. HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 13 de Maio de 2024.

Assinatura Eletrônica

07/06/2024 09:10:31.0

HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

06/06/2024 23:00:24.0

PAULO CESAR PELLANDA

Avaliador Externo (INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - RJ)

Assinatura Eletrônica

06/06/2024 17:36:30.0

GIDEON VILLAR LEANDRO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210, Bairro Jardim das Américas, Bloco PK/PL - DELT, Setor Tecnologia, Campus Centro Politécnico - Curitiba - Paraná - Brasil
CEP 81530-000 - Tel: (41) 3361-3622 - E-mail: ppgee@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 371006

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 371006

Dedico esta dissertação:

Aos meus pais, Pedro Pompilio e Debora Pompilio, por me proporcionarem o amor, o apoio e a educação que tornaram essa conquista possível. Sua fé inabalável em mim foi a base fundamental para que eu perseverasse nos momentos desafiadores.

Ao meu orientador, Professor Horacio Tertuliano dos Santos Filho, por sua inestimável orientação, sabedoria e incentivo. Sua expertise e paciência me guiaram durante toda a jornada, me ajudando a aprimorar minhas habilidades e a alcançar um trabalho de excelência.

Com imensa gratidão,

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento maior vai para os meus pais que me deram as condições de estudo e aprendizagem que me permitiram chegar até aqui. Na sequência agradeço ao Professor Ph.D Horacio Tertuliano Filho por toda a sua orientação, conselhos e acompanhamento desse trabalho. Nossas discussões técnicas foram muito importantes para meu desenvolvimento profissional. Agradeço igualmente aos Professores Doutor Gideon Villar Leandro do PPGEE - UFPR bem como ao Professor Ph.D Paulo César Pelanda do Instituto Militar de Engenharia – IME pelo tempo despendido na análise deste documento. Agradeço também pelas críticas e sugestões. Também não poderia deixar de agradecer a toda equipe do Laboratório de Telecomunicações, pelas discussões técnicas, brincadeiras e pelo excelente ambiente que em muito contribuiu para que este trabalho visse a luz do dia. Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram nesta minha trajetória.

Sonhar é libertar o espírito para que ele realize coisas que ajudem na nossa própria compreensão humana, mesmo que nem sempre todos eles se realizem.

(AUTOR, 2024)

RESUMO

O trabalho desenvolvido nessa dissertação analisa a interferência e degradação do sinal radioelétrico em sistemas ponto-multiponto causadas pela chuva em regiões costeiras, com foco no município de Pontal do Paraná. O estudo visa compreender e mitigar os efeitos adversos das interferências entre dispositivos que operam no mesmo canal de frequência em áreas geográficas limitadas. A pesquisa inclui a identificação e análise de interferências, otimização do espectro de frequência, coexistência com outras tecnologias sem degradação significativa de desempenho, segurança e privacidade das comunicações, além de testes de validação e medições em campo e laboratório. Os resultados dos testes foram utilizados para aprimorar algoritmos e desenvolver melhores práticas para o gerenciamento de interferências, bem como promover a integração de tecnologias emergentes. A dissertação destaca a importância das chuvas como fator influente na degradação do sinal, sublinhando a necessidade de estratégias eficazes para lidar com essas condições climáticas. Este estudo oferece excelentes perspectivas para a melhoria da qualidade de transmissão em ambientes costeiros, com potencial impacto positivo na mobilidade urbana e na qualidade de vida dos habitantes locais, e sugere a expansão do estudo para outras localidades, visando garantir um desempenho confiável e eficiente das redes de comunicação sem fio, especialmente em redes 5G.

Palavras-chave: Interferência co-canal, Degeneração de sinal, Telefonia móvel celular de 5G, Modelos de propagação, Sistemas Ponto-Multiponto, Sistemas de Transmissão.

ABSTRACT

In this Dissertation, an analysis of interference and degradation of radio signal due to rain in a Point-to-Multipoint System in Coastal Regions was conducted, with the Municipality of Pontal do Paraná serving as the study scenario. The aim was to comprehend and mitigate the adverse effects of interference that may occur among devices operating on the same frequency channel in a limited geographical area. The initial idea is the identification and analysis of interferences, optimization of the frequency spectrum, coexistence with other technologies without significant performance degradation, ensuring communication security and privacy, conducting tests, and validating solutions. A crucial aspect of this research was the implementation of field tests, including measurements within the project's coverage area and laboratory tests, to monitor performance and validate proposed solutions. The test results were utilized to refine an algorithm and develop best practices for interference management, as well as to facilitate the integration of emerging technologies. The future outlook for this project includes delving into interference studies in 5G networks to ensure reliable and efficient performance of wireless communication networks.

Keywords: Co-channel interference, Signal degradation, 5G mobile cellular telephony, Propagation models, Point-to-Multipoint Systems, Transmission Systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE PONTAL DO PARANÁ NA CONFIGURAÇÃO PONTO-MULTIPONTO.....	30
FIGURA 2: CANALIZAÇÃO COM TRÊS FREQUÊNCIAS EM UM MESMO CANAL.	45
FIGURA 3 - CANALIZAÇÃO COM REUSO DE FREQUÊNCIAS E COM DIVERSIDADE DE POLARIZAÇÃO	47
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO MUNDIAL	71
FIGURA 5 – MODELO DE EPSTEIN-PETERSON	84
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA PARA PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.	92
FIGURA 7 - POLIGONAL DA ROTA PARA OS TRECHOS PL-CAR - CAR-PS - PS-PL.....	98
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZANDO A FERRAMENTA GOOGLE EARTH.....	99
FIGURA 9 - REPRESENTA A ANÁLISE DO RUÍDO DEVIDO À POLARIZAÇÃO PARALELA.....	130
FIGURA 10 - REPRESENTA A ANÁLISE DO RUÍDO INTERFERENTE DEVIDO À POLARIZAÇÃO CRUZADA	132

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – RESULTADOS DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.....	100
GRÁFICO 2 – RESULTADOS DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.....	100
GRÁFICO 3 – RESULTADOS DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.....	101
GRÁFICO 4 – RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.	110
GRÁFICO 5 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.	111
GRÁFICO 6 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO POR INTERFERÊNCIA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.....	111
GRÁFICO 7 – RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.	112
GRÁFICO 8 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.	113
GRÁFICO 9 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO POR INTERFERÊNCIA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.....	113
GRÁFICO 10 – RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.	114
GRÁFICO 11 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.	115
GRÁFICO 12 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO POR INTERFERÊNCIA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.....	115
GRÁFICO 13 – RESULTADOS REFERENTES À POTÊNCIA DE RUÍDO PARA AS FREQUÊNCIAS ESTUDADAS.	119
GRÁFICO 14 – RESULTADOS REFERENTES À POTÊNCIA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE SAÍDA PARA OS LINKS.	120

GRÁFICO 15 – RESULTADOS REFERENTES À POTÊNCIA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE ENTRADA PARA OS LINKS.....	121
GRÁFICO 16 – RESULTADOS REFERENTES AO FATOR DE RUÍDO PARA OS LINKS.....	122
GRÁFICO 17 – RESULTADOS REFERENTES AO VALOR DE SISTEMA PARA OS LINKS.....	123
GRÁFICO 18 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA OS LINKS.....	125
GRÁFICO 19 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 50% DO TEMPO PARA OS LINKS.....	126
GRÁFICO 20 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 50% DO TEMPO PARA OS LINKS.....	126
GRÁFICO 21 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO DE ECO PARA TODOS OS <i>LINKS</i>	127
GRÁFICO 22 – RESULTADOS REFERENTES AO CÁLCULO DA PORTADORA/RUÍDO PARA TODOS OS LINKS.	129
GRÁFICO 23 – RESULTADOS REFERENTES DA INTERFERÊNCIA DEVIDO A POLARIZAÇÃO PARALELA DE TODOS OS <i>LINKS</i>	131
GRÁFICO 24 – RESULTADOS REFERENTES DA INTERFERÊNCIA DEVIDO A POLARIZAÇÃO CRUZADA DE TODOS OS LINKS.	133
GRÁFICO 25 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TOTAL DO SISTEMA DE TODOS OS <i>LINKS</i>	135
GRÁFICO 26 – RESULTADOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS NÃO SELETIVOS DE TODOS OS LINKS.	137
GRÁFICO 27 – RESULTADOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS SELETIVOS DE TODOS OS LINKS.	138
GRÁFICO 28 – RESULTADOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA EM MINUTOS POR ANO DE TODOS OS <i>LINKS</i> ..	139
GRÁFICO 29 – RESULTADOS REFERENTES A CONFIABILIDADE DE TODOS OS <i>LINKS</i>	140
GRÁFICO 30 – RESULTADOS REFERENTES AO TEMPO TOTAL DE INDISPONIBILIDADE TODOS OS <i>LINKS</i>	141

GRÁFICO 31 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA MÉDIA RECEBIDA PARA 4 GHz.....	143
GRÁFICO 32 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA VERTICAL RECEBIDA PARA 4 GHz.....	144
GRÁFICO 33 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA HORIZONTAL RECEBIDA PARA 4 GHz.....	144
GRÁFICO 34 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA MÉDIA RECEBIDA PARA 5 GHz.....	146
GRÁFICO 35 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA VERTICAL RECEBIDA PARA 5 GHz.....	147
GRÁFICO 36 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA HORIZONTAL RECEBIDA PARA 5 GHz.....	147
GRÁFICO 37 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA MÉDIA RECEBIDA PARA 8 GHz.....	149
GRÁFICO 38 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA VERTICAL RECEBIDA PARA 8 GHz.....	150
GRÁFICO 39 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA HORIZONTAL RECEBIDA PARA 8 GHz.....	150

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - FREQUÊNCIAS E SUAS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	39
QUADRO 2 - CANAIS DISPONÍVEIS PARA CANALIZAÇÃO	45
QUADRO 3 - CAPACIDADE DE SERVIÇO DAS FREQUÊNCIAS ESCOLHIDAS ...	48
QUADRO 4 - VALORES USUAIS DE M.	49
QUADRO 5 - RESUMO DOS PRINCIPAIS NÍVEIS DE POTÊNCIA.....	51
QUADRO 6 - PATAMARES DOS LIMIARES DE RECEPÇÃO	53
QUADRO 7 – VARIAÇÕES DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO MEIO	57
QUADRO 8 - PARÂMETROS DE CHUVA SEGUNDO A RECOMENDAÇÃO ITU-R 837-1.....	73
QUADRO 9 – DESCRIÇÃO DO FLUXOGRAMA.	93
QUADRO 10 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO A GEOMETRIA DO ENLACE.....	93
QUADRO 11 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO A POTÊNCIA DO SISTEMA.....	93
QUADRO 12 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO AS ATENUAÇÕES	94
QUADRO 13 - DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO AO RUÍDO DO SISTEMA.	94
QUADRO 14 - DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO A CONFIABILIDADE SISTEMA.....	94
QUADRO 15 – INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA PARA AS FREQUÊNCIAS DE 4 E 5 GHz	95
QUADRO 16 – INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.....	95
QUADRO 17 - SET-UP DO GERADOR DE SINAIS ALS-E028.....	96
QUADRO 18 – RESULTADOS REFERENTES A GEOMETRIA DOS SITES.....	97
QUADRO 19 - RESULTADO DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.....	99
QUADRO 20 - RESULTADO DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.....	100
QUADRO 21 - RESULTADO DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.....	101

QUADRO 22 - RESULTADOS RELATIVOS À ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA 4 GHz.	103
QUADRO 23 - RESULTADOS RELATIVOS À ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA 5 GHz.	104
QUADRO 24 - RESULTADOS RELATIVOS À ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA 8 GHz.	105
QUADRO 25 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DA ATENUAÇÃO TOTAL PARA 4 GHz.	106
QUADRO 26 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DA ATENUAÇÃO TOTAL PARA 5 GHz.	107
QUADRO 27 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DA ATENUAÇÃO TOTAL PARA 8 GHz.	108
QUADRO 28 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA PARA FREQUÊNCIA DE 4 GHz.....	110
QUADRO 29 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA PARA FREQUÊNCIA DE 5 GHz.....	112
QUADRO 30- RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA PARA FREQUÊNCIA DE 8 GHz.....	114
QUADRO 31 – RESULTADOS REFERENTES A POTÊNCIA DE RUÍDO PRESENTE NOS <i>LINKS</i>	118
QUADRO 32 – RESULTADO DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO (<i>RSR_sáda</i>) [dB].....	119
QUADRO 33 - RESULTADO DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO (<i>RSR_entrada</i>) [dB] ..	120
QUADRO 34 - FATOR DE RUÍDO (<i>FR</i>).....	122
QUADRO 35 - RESULTADOS REFERENTES AO VALOR DE SISTEMA DOS <i>LINKS</i>	123
QUADRO 36 - RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO NOS <i>LINKS</i>	124
QUADRO 37 - RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 50% DO TEMPO NOS <i>LINKS</i>	125
QUADRO 38 - RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 80% DO TEMPO NOS <i>LINKS</i>	125
QUADRO 39 - RESULTADO REFERENTE AO RUÍDO DE ECO PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS	127

QUADRO 40 - RESULTADO REFERENTE AO CÁLCULO DA PORTADORA/RUÍDO PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS	128
QUADRO 41 – RESULTADOS DO RIPP [dB] PARA TODOS OS <i>LINKS</i> E PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS	130
QUADRO 42 - RESULTADOS DO RIPC [dB] PARA TODOS OS <i>LINKS</i> E PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS	132
QUADRO 43 - RESULTADOS DO R_{total} [dB] PARA TODOS OS <i>LINKS</i> E PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS	133
QUADRO 44 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA [%].	135
QUADRO 45 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS NÃO SELETIVOS (PI) [%].	136
QUADRO 46 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS SELETIVOS (PS) [%].	137
QUADRO 47 - RESULTADOS DÀ PROBABILIDADE DO PERÍODO DE INOPERÂNCIA EM MINUTOS POR ANO (PI_{μ}) [%]	138
QUADRO 48 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES À CONFIABILIDADE (C) [%].....	139
QUADRO 49 - VALORES DA DETERMINAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE INDISPONIBILIDADE (TTI)[%].....	141
QUADRO 50 – VIABILIDADE DO ENLACE DE 4 GHZ.	143
QUADRO 51 – PARA FREQUÊNCIA DE 8 GHZ.	148

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

D_{θ}	- Discriminação angular da antena
F_n	- Frequência central do n-ésimo canal da metade inferior da faixa
F'_n	- Frequência central do n-ésimo canal da metade superior da faixa
T_m	- Atraso médio de ocorrência de propagação
f_0	- Frequência central [MHz]
3GPP	- <i>3rd Generation Partnership Project</i>
Aca	- Atenuação total no cabo
Acabos	- Atenuação nos cabos da estação transmissora A
Acb	- Atenuação no cabo coaxial da estação
Aconectores	- Perda nos conectores da estação transmissora A
Ael	- Atenuação em espaço livre
Ago	- Atenuação nos guias de onda
At	- Atenuação total do enlace
Atob	- Perda por obstrução
AZa	- Azimute do ponto A
AZb	- Azimute do ponto B
Bs	- Largura das faixas das áreas de assinatura
BW	- Largura de banda [MHz]
c	- Velocidade da propagação de onda
d	- Distância entre as estações expressa em quilômetros
d _{eff}	- Diâmetro efetivo da gota de chuva
dN ₁	- Gradiente de refratividade
ED	- Espaçamento duplex
fb	- Frequência do bit
G _r	- Ganho da antena de recepção
G _t	- Ganho da antena de transmissão
h ₁	- Altura real da antena na torre de transmissão
h ₂	- Altura real da antena na torre de recepção
K	- Constante de Boltzmann
Lat A	- Latitude referente a estação que se localiza mais a oeste
Lat B	- Latitude referente a estação que se localiza mais a oeste
lb	- Largura da banda de ocupação espectral

l_{bN}	- largura do filtro de <i>Nyquist</i>
m	- número da modulação (m-QAM ou m-PSK)
Π	- Fator de ocorrência de propagação
N	- Numero de canais de ida ou de volta
P	- Densidade do vapor de água
P_r	- Potência no receptor
$P_{ruído}$	- Potência de ruído
P_t	- Potência no transmissor
P_{total}	- Potência total
R	- Raio da terra
$R_{0,01}$	- Precipitação pluviométrica para 0,01% do tempo anual
r_{1m}	- Raio menor
S_m	- Área de assinatura para a fase mínima
S_{nm}	- Área de assinatura para a fase não mínima
Sw	- Área de assinatura
T	- Temperatura
T_r	- Atraso de referência
$X\sigma$	- Variável gaussiana de média zero
Y	- expoente da perda de tempo
Y_R	- Atenuação unitária
Z	- Fator de correção
β	- Fator de excesso de banda do filtro <i>Nyquist</i>
Δ	- Distância ortodrômica entre as estações expressa em graus
λ	- Comprimento de onda
λ_m	- Profundidade média para a fase mínima
λ_{nm}	- Profundidade média para a fase não mínima
σ	- Coeficiente de reflexão
Ψ	- Fator de ajuste ao ambiente
f	- Faixa de frequência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
1.2 JUSTIFICATIVA E O ESTADO DA ARTE	26
1.3 METODOLOGIA.....	27
1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	30
1.4.1 Objetivo Geral	31
1.4.2 Objetivos Específicos	31
1.4.3 Estrutura da Dissertação	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	34
2.1 INTRODUÇÃO	34
2.2 CONCEITOS BÁSICOS PARA O PROJETO DE UM RADIO ENLACE.....	34
2.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	36
2.4 DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA	39
2.4.1 Determinação dos Planos de Frequência.....	41
2.4.2 Canalização das Sessões Radioelétricas.....	44
2.4.3 Determinação dos Tipos de Serviços.....	48
2.4.4 Determinação da Eficiência Espectral (ee).....	48
2.4.5 Determinação do <i>Throughput</i>	50
2.5 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA	50
2.5.1 Potência Transmitida (P_t) [dBm].....	51
2.5.2 Potência Efetiva Isotropicamente Radiada (E.i.r.p) [dBm].....	51
2.5.3 Potência Recebida (P_r) [dBm]	52
2.5.4 Limiar de Recepção (LR) [dBm]	52
2.5.5 Margem de Desvanecimento (MD) [dB]	53
2.5.6 Margem de Desvanecimento por Interferência.....	54
2.6 DETERMINAÇÃO DO RUÍDO.....	54
2.6.1 Relação Sinal/Ruído (RSR) [dB]	55
2.6.2 Fator de Ruído (FR)	56
2.6.3 Ganho do sistema ou valor do sistema (VS) [dBm].....	56
2.6.4 Nível de ruído térmico (RT) [dBW]	57
2.6.5 Contribuição do Ruído Térmico para 50% e 80% do tempo ($RT_{50\%}$ / $RT_{80\%}$) [dBm]	58

2.6.6 Ruído de Eco (RE) [dB]	58
2.6.7 Relação Portadora/Ruído (C/N) [dB]	59
2.6.8 Ruído interferente por polarização paralela (RI _{PP}) [dB] e ruído interferente por polarização cruzada (RI _{PC}) [dB].....	60
2.6.9 Ruído Total (R _{total}) [dBm]	61
2.7 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE	62
2.7.1 Inoperância do Sistema (IS) [%].....	62
2.7.2 Probabilidade de Inoperância em Razão do Desvanecimento não Seletivo (PI) [%]	63
2.7.3 Probabilidade de Inoperância em razão do Desvanecimento Seletivo (PS) [%] ..	64
2.7.4 Probabilidade do período de Inoperância total em minutos por ano (PI _μ) [%] ..	65
2.7.5 Confiabilidade (C) [%].....	65
2.7.6 Tempo total de indisponibilidade (TTI)	66
2.7.7 Disponibilidade do Sistema	66
3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO E EFEITOS DAS ATENUAÇÕES SOBRE O LINK	68
3.1 INTRODUÇÃO	68
3.2 ATENUAÇÕES SOBRE O <i>LINK</i>	69
3.2.1 Introdução	69
3.2.2 Atenuação em espaço livre (A _{el}) [dB]	70
3.2.3 Determinação da atenuação devido à chuva (A _{ac}) [dBm]	70
3.2.4 Atenuação nos cabos (A _{ca}) [dB]	73
3.2.5 Atenuação nos guias de onda (A _{go}) [dB].....	74
3.2.6 Atenuação nos circuitos de derivação (A _{cdtx}) [dB]	74
3.2.7 Perda por obstrução (A _{tob}) [dB].....	74
3.2.8 Determinação da área de assinatura (S _w) [dB].....	74
3.2.9 Atenuação por gases atmosféricos (A _{ga}) [dB]	75
3.2.10 Determinação da Atenuação Total (A _t) [dB].....	76
3.3 PARTICULARIZAÇÃO DOS MODELOS.....	77
3.3.1 O modelo de propagação de Weissberger	79
3.3.2 O modelo de propagação de LEE	81
3.3.3 O modelo de propagação de Epstein-Peterson.....	83
3.3.4 O modelo de propagação de Pompilio	86

4 ESTUDO DE CASO	91
4.1 APRESENTAÇÃO DO ENLACE	95
4.2 RESULTADOS RELATIVOS À GEOMÉTRICA DO ENLACE	97
4.2.1 Análise Gráfica	98
4.2.2 Análise dos modelos de propagação	99
4.3 RESULTADOS REFERENTES AS ATENUAÇÕES.....	102
4.4 RESULTADOS RELATIVOS À POTÊNCIA	109
4.5 RESULTADOS RELATIVOS AO RUÍDO	117
4.5.1 Resultados relativos à potência de ruído (Pruído) [dBm]	117
4.5.2 Resultados relativo à relação sinal/ruído (RSR) [dB]	119
4.5.3 Resultados relativos ao Fator de Ruído (FR)	121
4.5.4 Determinação do valor de sistema (VS) [dBm].....	123
4.5.5 Determinação do nível de ruído térmico (RT) [dBm]	124
4.5.6 Determinação do ruído térmico para 50% e 80% do tempo	125
4.5.7 Resultados calculados para o ruído de eco (RE) [dB].....	127
4.5.8 Resultados calculados para a relação portadora/ruído (C/N) [dB]	128
4.5.9 Resultados do ruído interferente devido a polarização paralela (RI _{PP}) [dB] ...	129
4.5.10 Resultados do ruído interferente devido a polarização cruzada (RI _{PC}) [dB] .	131
4.5.11 Determinação do ruído total do sistema (R _{total})[dB]	133
4.6 RESULTADOS RELATIVOS À CONFIABILIDADE	135
4.6.1 Resultados referentes à inoperância do sistema (IS) [%].....	135
4.6.2 Probabilidade de inoperância por desvanecimentos não seletivos (PI) [%] ...	136
4.6.3 Probabilidade de inoperância por desvanecimentos seletivos (PS) [%].....	137
4.6.4 Valores referentes a probabilidade de inoperância minutos por ano (PI _μ) [%].....	138
4.6.5 Determinação da confiabilidade (C) [%]	139
4.6.6 Determinação da porcentagem de tempo total de indisponibilidade (TTI) [%]	140
4.6.7 Resultados referentes à disponibilidade do sistema	141
4.7 ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS OBTIDOS	151
5 CONCLUSÕES	153
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
5.2 CONTRIBUIÇÕES	154
5.3 PRÓXIMOS PASSOS DO PROJETO	155
5.4 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	156

REFERÊNCIAS.....	158
-------------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra a estruturação dessa Dissertação e também apresenta em linhas gerais os tópicos relacionados a contextualização do trabalho, as justificativas da escolha do tema, os objetivos pretendidos, a metodologia utilizada, a pesquisa bibliográfica e finalmente a definição dos assuntos que serão abordados nos demais capítulos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Historicamente os principais marcos das telecomunicações podem ser assim resumidos:

Alexander Graham Bell (1847-1922) em 1875, na Inglaterra, apresentou um pioneiro sistema telefônico que permitia a transmissão inteligível da voz por meio de fios.

Marchese Guglielmo Marconi (1874-1937) em 1897, na Itália, utilizou uma bateria, uma bobina de indução e duas esferas metálicas que atuavam como centelhadores, o que possibilitou o envio de sinais até cerca de 20 quilômetros de distância.

Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894), na Alemanha, estudou as ondas eletromagnéticas, que foram essenciais para o desenvolvimento das comunicações sem fio.

Roberto Landell de Moura (1861 – 1928), em 1899, em São Paulo, elaborou a primeira transmissão de voz do Brasil. (Medeiros, 2016, p. 36).

Todos esses marcos foram fundamentais para o avanço das telecomunicações e em muitos casos, o ponto de partida para o grande desenvolvimento desta área do conhecimento humano.

Relativamente ao contexto desse trabalho sabe-se que a análise das condições de degradação do sinal de radioelétrico em regiões costeiras, dentro de sistemas ponto-multiponto, ocupa uma posição proeminente no campo das telecomunicações e tecnologias de comunicação sem fio. As peculiaridades dessas regiões, caracterizadas por sua proximidade com corpos d'água e intempéries naturais, têm um impacto substancial na propagação de ondas eletromagnéticas usadas em sistemas de transmissão.

Os sistemas ponto-multiponto desempenham também um papel central na promoção da conectividade em áreas urbanas e rurais, oferecendo uma infraestrutura de comunicação flexível e eficiente. No entanto, quando implementados em regiões costeiras de alto índice pluviométrico, enfrentam uma série de desafios que podem comprometer o desempenho da rede e a qualidade do serviço.

Um dos fatores-chave a considerar é a interferência eletromagnética decorrente da proximidade com a água do mar. A água salgada apresenta propriedades que causam absorção e reflexão de ondas de rádio, resultando em atenuação do sinal e regiões com probabilidade de sinal instável. Além disso, as condições marítimas podem acelerar a corrosão de equipamentos de transmissão e recepção, aumentando a necessidade de manutenção constante.

Outra questão crítica é a variabilidade das condições atmosféricas em regiões costeiras. Mudanças abruptas no clima, tal como neblina, chuvas e ventos fortes, podem impactar significativamente a propagação do sinal, levando a flutuações na qualidade da conexão. Essas condições imprevisíveis exigem o desenvolvimento de algoritmos e protocolos adaptativos para manter uma transmissão estável.

Além disso, as características geográficas das áreas costeiras, como a presença de penínsulas, ilhas e falésias, também influenciam a propagação do sinal. Isso exige um planejamento cuidadoso da infraestrutura de torres e antenas para otimizar a cobertura e minimizar os efeitos adversos das condições locais.

Para superar os desafios enfrentados pelos sistemas ponto-multiponto em regiões costeiras, é essencial realizar uma análise abrangente das condições locais. Isso inclui medições de campo, modelagem de propagação e análise de dados de desempenho. Com base nessa análise, estratégias específicas de implantação e otimização podem ser desenvolvidas para cada local, garantindo conectividade confiável e de alta qualidade, mesmo em ambientes desafiadores.

Resumidamente, a análise das condições de degradação do sinal radioelétrico em regiões costeiras, no contexto de sistemas ponto-multiponto, desempenha um papel crucial na garantia do sucesso e da eficácia das redes de transmissão nessas áreas. Superar os desafios associados à proximidade com o mar e às variações climáticas requer pesquisa contínua, desenvolvimento tecnológico e adaptação de estratégias de implantação para atender às demandas específicas desses ambientes complexos. Isto posto, daquilo que concerne à área de radiopropagação, o estudo desenvolvido nesta dissertação procurou focar na

discussão dos aspectos que influenciam diretamente um sistema de transmissão: o seu desempenho e a sua confiabilidade onde o desempenho é caracterizado como sendo uma combinação de vários fatores que se diversificam e que vão desde a ocupação espectral, normas técnicas e resoluções legais, estrutura física, modelos de propagação, níveis de potência e níveis de ruído enquanto que eficiência espectral em linhas gerais, indica como a banda utilizada na transmissão está sendo usada, ou seja, quanto mais eficiente for o uso da banda, maior será o volume de informações transmitidas. Neste trabalho, a eficiência espectral foi expressa pela associação da escolha das frequências de operação em relação as legislações vigentes que as regularizam.

Relativamente aos modelos de propagação, escolheu-se modelos que pudessem ser utilizados com eficiência em cenários marítimos e que atendessem a características específicas, com a finalidade de satisfazer os requisitos e a complexidade das aplicações, através do modelamento dos efeitos de propagação do canal, (Roche, 2012 e Kitao, 2015). Esta dissertação também apresenta um modelo especificamente desenvolvido para melhor caracterização à área de estudo.

Já com relação aos níveis de potência é sabido que estes indicam a influência que os elementos que constituem o ambiente de propagação exercem sobre o sinal transmitido até seu destino final, assim como os níveis de ruído descrevem qualquer sinal indesejável que interfira no processo de transmissão do sistema. E por fim, a confiabilidade se traduz como sendo a habilidade no qual o sistema executa suas funções, dentro de limites permitidos por normas técnicas. Para assegurar um desempenho satisfatório do sistema, não é prudente dissociar nenhum desses pontos pelo fato de que, a simples ideia de concepção de um Sistema de Transmissão passa pela compreensão desses fatores conjuntamente interligados.

Por meio de um estudo de caso de um Sistema de Transmissão ponto multiponto utilizando três *links* e três diferentes frequências, foram obtidos dados para mitigar as degenerações do sinal radioelétrico em região costeira e propor soluções.

Uma contribuição importante desse trabalho, foi a apresentação de uma metodologia original, oferecendo uma ferramenta visual interativa, o "Software de Análise da Degeneração do Sinal Radioelétrico" capaz de comparar os resultados de diferentes modelos de propagação, especificamente o modelo desenvolvido.

Essa abordagem traz uma interface intuitiva, permitindo explorar visualmente os parâmetros do sistema com mais transparência, fornecendo informações

detalhadas sobre as características operacionais na transmissão/recepção entre os *links*.

1.2 JUSTIFICATIVA E O ESTADO DA ARTE

A justificativa para realizar esta pesquisa surgiu inicialmente a partir da linha principal de investigação do Laboratório de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Além disso, a necessidade de abordar os desafios relacionados à degradação do sinal radioelétrico em regiões costeiras tornou-se evidente. Com o advento da tecnologia 5G, a propagação do sinal enfrenta potenciais interferências devido a diversos fatores, como obstáculos físicos, interferências, geografia local e a presença de água salgada, que pode absorver sinais de rádio em determinadas frequências Casciato (2003). Esses desafios podem impactar a latência da rede 5G, e é crucial abordá-los para garantir que a latência não fique abaixo dos limites aceitáveis de 1 ms.

Dentre os trabalhos correlatos na área de Sistemas de Transmissão relativos ao tema da presente dissertação cita-se:

- Otobo, T. M, (2020) desenvolveu o SINMCEL - Nova metodologia de visualização gráfica aplicada a um sistema de transmissão ponto multiponto, o que resultou em uma tese de doutorado apresentada ao PPGEE/UFPR em 2020 na qual a autora apresenta diversos aspectos significativos para a análise de um sistema.
- Torres, A. P, (2019) realizou uma avaliação de desempenho das tecnologias DSRC e LORA aplicáveis a Sistemas de Comunicação Móvel Veicular de modo a melhorar a performance de comunicação de veículos em movimento diminuindo a interferência do sinal eletromagnético, o que resultou em uma dissertação de mestrado apresentada ao PPGEE/UFPR em 2019.
- Nascimento Jr., E. (2013), fez a implantação de um algoritmo para análise de radiopropagação cuja aplicação se deu em uma frequência restrita de uso exclusivo por órgãos de segurança pública. Esse seu trabalho lhe rendeu uma dissertação de mestrado apresentada ao PPGEE/UFPR em 2016. Nesse trabalho diversos aspectos relacionados a concepção de sistemas são também apresentados.
- Stahlke, R. F. (2006) debruçou-se sobre a análise e ao estudo da influência dos efeitos atmosféricos na propagação de ondas eletromagnéticas

especificamente na faixa de 23,6 GHz. O resultado desse estudo culminou em uma dissertação de mestrado apresentada ao PPGEE/UFPR em 2013.

Cada autor mencionado anteriormente contribuiu significativamente para a área de Sistemas de Transmissão, onde trabalhos científicos impactantes têm tido poucas atualizações. Este trabalho visa oferecer uma contribuição original à área de radiopropagação, focalizando na degradação do sinal radioelétrico em regiões costeiras sob condições climáticas adversas bem como a compreensão das interferências geradas. Para alcançar tal objetivo, utilizou-se modelos de predição específicos e adaptados à realidade do caso estudado bem como buscou-se uma adaptação aos padrões da 5G.

Na fase inicial deste estudo, realizou-se uma pesquisa sobre artigos que pudessem fornecer contribuições bibliográficas para o desenvolvimento do tema em questão. Os principais trabalhos de destaque foram três artigos científicos com alto fator de impacto correlatos ao tema:

- CHAPMAN e COLOMBI que mostram a impossibilidade do uso da tecnologia GSM (Global System for Mobile Communications) quando se trata de adaptações para a 5G e que propõem o uso do padrão New Radio para melhor compreensão das interferências.
- GERZAGUET, SIROTKIN e HAGARTY dão foco as redes e aos dispositivos que utilizam a tecnologia 5G, mostrando que a interferência dentro deste contexto, refere-se à interferência que ocorre quando vários dispositivos ou células da mesma frequência operam próximos uns dos outros, resultando em interferências indesejadas nas comunicações, o que motivou para que nesse trabalho, fossem utilizadas várias frequências simultaneamente.

1.3 METODOLOGIA

A análise da interferência e degradação do sinal radioelétrico em um Sistema de Transmissão operando em ambiente marítimo foi realizada por meio de uma metodologia que incluiu várias etapas detalhadas a seguir Azpilicueta (2014) e Jakes (1974):

1. Definição dos objetivos do estudo: Primeiramente analisou-se quais seriam os objetivos específicos do estudo, das interferências e das degradações de um Sistema de Transmissão operando em ambiente marítimo e em tecnologia 5G, em como avaliar essas interferências e degradações em diferentes cenários de implantação do 5G, em como medir a qualidade do sinal em presença de interferência, em como identificar as causas dessas interferências, em como realizar a avaliação do desempenho do sistema em termos de qualidade de serviço, taxas de transferência de dados, cobertura, das anterioridades já existentes dentre vários outros aspectos.

2. Seleção da área de estudo: O segundo passo crucial na metodologia envolveu a seleção cuidadosa de uma área geográfica apropriada para realizar a caracterização de um cenário, possibilitando a condução das análises de forma eficaz. Nesse processo, foram levados em consideração fatores como densidade populacional, características morfológicas e topográficas da região, bem como a distribuição dos usuários e estações base locais além de fatores relacionados ao uso de distintas frequências, demanda de serviço, quantidade de usuários por canal e a possibilidade técnica de se utilizar sistemas do tipo ponto - multiponto dentro dessa faixa.

3. Planejamento da medição: Uma vez delimitada a área de interesse ou o cenário no qual este projeto de pesquisa foi desenvolvido, iniciou-se o terceiro passo da metodologia que foi a determinação das métricas de interesse e as metodologias de medição para a caracterização das interferências e das degradações. Isso incluiu as faixas de frequência específicas que foram trabalhadas, configurações de largura de banda, análise do nível de interferência, potência do sinal recebido e transmitido, qualidade do sinal, taxa de erro de bits, modelos de propagação utilizados dentre outros. Todo o planejamento levou em conta um cenário de teste que envolvesse todos os dispositivos operando em frequências próximas.

4. Instrumentação e medição: Com as métricas tendo sido definidas, iniciou-se esta importante etapa que foi a escolha dos equipamentos e ferramentas de medição adequados para realizar as medições necessárias. Isso incluiu o uso de programas de predição de análise de dados específicos e voltados a 5G tais como por exemplo o Forsk da Attol, o Celplanner da Celplan, simulações nos *softwares Radio Mobile* (ferramenta computacional de predição *open source*) e *LinkCalc* (ferramenta computacional de predição fornecida pela empresa *LigoWave* na versão

open source) e também simulações na ferramenta *MatLab* (MATrix LABoratory - que realiza cálculos numéricos), o uso de analisadores de espectro, dispositivos de medição de potência entre outros. Por se tratar de uma pesquisa de caráter exploratório de um estudo de caso, a base teórica utilizada foi fundamentada em literatura específica da área.

5. Implantação da estação base: Esta etapa consistiu na implementação e configuração da estação base 5G na área de estudo de acordo com um *layout* planejado. Nesta etapa, a configuração das estações base, sua potência de transmissão e a configuração do sistema radiante desempenhou função primordial e consistiu em uma das principais etapas da metodologia ora apresentada.

6. Realização das medições: Com a estação base instalada, o cenário definido e com a seleção prévia dos equipamentos de teste bem como de todo o sistema radiante definido, iniciou-se a etapa das medições das interferências e degenerações em diferentes locais dentro da área de estudo. Antes da realização das medições foi desenvolvido um plano de teste. Seguindo esse plano, as métricas de interesse tais como, por exemplo, os níveis de potência do sinal interferente, a força do sinal do 5G, a taxa de erro de bloco (BLER), a latência, a taxa de transferência, a degradação da qualidade de sinal e a diminuição da capacidade foram medidos e registrados de modo que os resultados obtidos pudessem ter sido sistematizados.

7. Análise e interpretação dos dados: Esta etapa consistiu na análise dos dados coletados e interpretação dos resultados. Foram identificados os padrões de interferência e degeneração do sinal e um entendimento dos efeitos na qualidade do sinal 5G. Foi então realizada uma avaliação do desempenho do sistema, análise das variações de sinal, pontos problemáticos, dentre outros aspectos relevantes para a caracterização das degradações e das interferências. Para tal foram utilizadas ferramentas de processamento e visualização de dados que permitiram extrair informações relevantes e realizar comparações entre diferentes cenários de teste.

8. Avaliação dos efeitos da interferência e degradação e propostas de solução: Com base nos resultados da análise e na interpretação dos dados obtidos, foram avaliados os efeitos e identificadas possíveis soluções ou mitigações para reduzir as interferências e degradações no desempenho do sistema. Isso consistiu em incluir ajustes e um novo planejamento, bem como uma reconfiguração, na realocação e reajustes de frequências, na otimização e reconfiguração de antenas, dentre outras soluções que foram discutidas, analisadas e implementadas.

9. Validação e otimização: Após as análises técnicas foram realizados testes adicionais para validar as propostas de mitigação e otimização.

10. Documentação dos resultados do estudo: a metodologia utilizada, os dados coletados, uma descrição detalhada dos locais de teste incluindo as análises realizadas, as discussões realizadas, os ajustes realizados e as conclusões alcançadas são apresentadas nessa dissertação.

Do exposto a FIGURA 1, ilustra o Sistema de Transmissão que será analisado neste trabalho.

FIGURA 1- SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE PONTAL DO PARANÁ NA CONFIGURAÇÃO PONTO-MULTIPONTO



FONTE: O autor (2024)

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

Com a evolução constante dos dispositivos móveis e o aumento da demanda por dados, a capacidade espectral disponível se torna um recurso valioso e limitado. Portanto, é crucial entender como as interferências e as degradações podem afetar o

desempenho de um sistema de transmissão e desenvolver técnicas para minimizar seus efeitos *Rapport TS Wireless Communications* (2002).

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é de realizar a análise das interferências bem como da degradação de sinal radioelétrico dentro de um sistema de transmissão ponto-multiponto em uma região marinha com a utilização de três distintas frequências (4, 5 e 8 GHz) de modo a compreender e mitigar os efeitos adversos das interferências e degradações que podem ocorrer entre os dispositivos que operam no mesmo canal de frequência em uma área geográfica limitada. É sabido, sob a ótica de um sistema de transmissão, que a interferência ocorre quando múltiplos dispositivos ou estações-base estão transmitindo e recebendo sinais na mesma frequência.

Segundo o órgão de padronização para redes móveis a 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) no contexto da 5G, a interface aérea utilizada globalmente é o padrão *New Radio* (NR). Este padrão permite a transmissão de dados em frequências mais altas e usa técnicas avançadas, como *beamforming* e *massivo MIMO* para melhorar a capacidade e a eficiência espectral e isso, associado a outros fatores, é o que permite o estudo das interferências e degradações em redes e sistemas de transmissão.

1.4.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos dessa dissertação destacam-se:

- Avaliação e quantificação do impacto da interferência e da degradação de sinal: O que se traduziu pela realização de testes e medições de sinal dentro de um cenário específico e na análise de resultados por programas computacionais específicos de modo a se compreender a magnitude e os padrões de interferência. Isso envolveu examinar diversas métricas como os efeitos da chuva sobre o *link*, a qualidade do sinal, a taxa de erro de bits, a confiabilidade de conexão e a qualidade de voz.

- Identificação e análise de interferências: Com a complexidade da rede e dos dispositivos nela conectados, foi crucial identificar e analisar as fontes de interferência. Isso envolveu a compreensão das características das interferências, das degradações, a identificação de padrões e a coleta de dados para avaliar seu impacto na qualidade do serviço e a garantia de um desempenho otimizado da rede
- Otimização do espectro: Levando em consideração as interferências e visando a sua minimização foram utilizadas alocações dinâmicas de frequência através do uso de algoritmos inteligentes.
- Coexistência com outras tecnologias: A rede proposta precisou coexistir harmoniosamente com outras tecnologias de comunicação existentes no local de estudo, tais como redes *Wi-Fi*, redes celulares legadas (3G, 4G) e dispositivos de comunicação de curto alcance (*near-field*). Estudar as interferências entre essas tecnologias e desenvolver soluções que empregassem o uso de técnicas avançadas de processamento de sinal, como filtragem adaptativa e cancelamento de interferência que permitiriam a coexistência eficiente e sem degradação significativa do desempenho teria sido um desafio importante, mas que infelizmente não foi considerado no escopo desse trabalho.
- Testes e validação de soluções: Foi fundamental realizar testes em campo, ou seja, medições nas regiões de abrangência do cenário e também em laboratório tanto para monitorar o desempenho quanto para validar as soluções propostas, também serviu para avaliação de métricas de desempenho bem como a comparação de diferentes abordagens de mitigação. Os resultados desses testes foram usados para aprimorar os algoritmos e desenvolver melhores práticas para o gerenciamento de interferências.

1.4.3 Estrutura da Dissertação

Em conformidade com as normas e com a estrutura de um documento científico, os demais capítulos desta tese estão organizados em seis capítulos.

Capítulo 2: Apresenta uma breve fundamentação teórica recursivamente explicada em livros didáticos utilizados nos programas de graduação e de pós-graduação das Universidades e Centros de pesquisa, mostrando sucintamente a descrição sobre os elementos que incorporam a arquitetura básica do sistema.

Capítulo 3: Apresenta especial destaque para o modelo desenvolvido bem como para os modelos de propagação utilizados bem como os efeitos da chuva sobre um *link* de comunicação.

Capítulo 4: Apresenta o estudo de caso desenvolvido nessa dissertação aonde o disposto nos Capítulos 2 e 3 são aplicados. Onde se realiza a campanha de medida e aonde as justificativas são apresentadas.

Capítulo 5: Neste capítulo, são apresentadas as conclusões bem como as perspectivas futuras concernentes a esta dissertação.

Capítulo 6: Contém a lista bibliográfica que serviram de base para o desenvolvimento desta dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais fatores que influenciam a propagação da onda de rádio em sistemas sem fio destacam-se, Ribeiro (2004):

Reflexão: Ondas de rádio podem ser refletidas por obstáculos como prédios, veículos e outras superfícies, resultando em múltiplos caminhos de propagação;

Difração: Ondas de rádio podem contornar obstáculos e se curvar ao redor de cantos de edifícios, permitindo a propagação além da linha de visão direta;

Espalhamento: Ondas de rádio podem ser dispersas por objetos na área de propagação, criando múltiplos caminhos de propagação e afetando a intensidade do sinal recebido;

Atenuação: A perda de sinal devido a obstáculos, distância de propagação e absorção pelo ambiente também é um fator importante na propagação de ondas de rádio em sistemas sem fio;

Interferência: A presença de sinais de rádio de outras fontes pode causar interferência e afetar a qualidade da comunicação sem fio;

Esses fatores combinados influenciam a qualidade, a cobertura e a confiabilidade das comunicações em sistemas sem fio.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS PARA O PROJETO DE UM RADIO ENLACE

Os principais desafios de concepção de um rádio enlace e que exigem uma análise de Engenharia *par i passo* são (Tertuliano, H. S. F, 2017), Gosling (2004), Blaunstein (2007) e Budden (2005):

- Disponibilidade de espectro;
- Propagação do sinal;
- Equipamentos a serem utilizados;
- Quantidade de informações;
- Localização de terminais;
- Restrições legislativas;
- Potência em níveis aceitáveis;
- Relação sinal-ruído não degradante;
- Taxa de dados;
- Qualidade da informação;
- Fornecedores de soluções;
- Tipo de serviço;

- Base de dados disponível;
- Modelos de Propagação;
- Confiabilidade de uso contínuo;
- Cadastramento no SITAR.

Operacionalmente será feita uma divisão em partes do projeto de modo a assegurar que os valores obtidos de confiabilidade irão garantir um funcionamento do enlace dentro de níveis de sinal aceitáveis. Esta divisão consiste basicamente nos seguintes pontos: Análise dos aspectos físicos, análise da frequência, análise das atenuações, análise da potência, análise do ruído, escolha dos modelos de propagação e análise da confiabilidade.

Para cada uma das subdivisões acima destacam-se:

- Análise dos aspectos físicos (parâmetros geométricos).

Esta análise corresponde a uma parametrização do rádio enlace e em suma resume-se a proceder ao cálculo da geometria com determinação das latitudes e longitudes dos pontos de transmissão e recepção para enlaces ponto-a-ponto, ponto-multiponto ou latitudes e longitudes da transmissão fixa. Cálculo da distância ortodrômica, determinação da altitude do terreno, cálculo de azimutes, ângulos de elevação das antenas, da distância empírica que o sinal percorre, determinação da Poligonal da Rota dentre outros.

- Análise da Frequência.

Esta análise consiste na determinação da frequência de operação, do tipo de antena, do tipo de polarização, do tipo de cabo; do tipo de conector, do tipo de torre e sua estrutura, do fator de curvatura da terra, cálculo das zonas de Fresnel, canalização das seções radioelétricas, taxa de dados, tipos de serviços, planos de frequência, *throughput*, limiar de recepção dentre outros.

- Análise das Atenuações.

Esta análise consiste basicamente na determinação da atenuação em espaço livre, ganho das antenas de transmissão e de recepção, atenuações devido à chuva, perda nos cabos, perda nos circuitos de derivação, perda por absorção, perda total no percurso ou atenuação líquida dentre outros.

- Análise da Potência.

Esta análise consiste na pré-fixagem do nível de potência do sistema, na determinação da potência de transmissão, da potência efetiva isotropicamente irradiada, do nível do sinal recebido, do diagrama de níveis de sinal, da margem de desvanecimento dentre outros.

- Análise do Ruído.

A análise de ruído consiste basicamente na determinação do ruído térmico, do fator de ruído, da relação sinal-ruído, da figura de ruído dentre outros.

- Escolha dos modelos de propagação.

A escolha do modelo de propagação depende de vários fatores, incluindo a topografia, as condições atmosféricas, a frequência da transmissão, a salinidade da água, a vegetação, a área de assinatura e outros fatores.

- Análise da Confiabilidade.

A análise da Confiabilidade permite a determinação da margem de desvanecimento, da disponibilidade, da sensibilidade do receptor, da margem de sinal recebido, da capacidade e da confiabilidade dentre outros.

A determinação de todos os itens elencados de modo criterioso dará ao rádio enlace grande possibilidade de funcionamento.

2.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Em Ribeiro (2004) pode-se encontrar de forma prática os conceitos para propagação em espaço livre, bem como em Salema (2002), Hall, Barclay e Hewitt (1996) e Bosco (2002). A partir das informações de latitude e longitude das antenas e frequência, pode-se calcular a distância entre os pontos EQUAÇÕES (2.1) e (2.2), os azimutes EQUAÇÕES (2.3) e (2.4) das antenas, o comprimento de onda EQUAÇÃO (2.5) e até mesmo as dimensões da primeira zona de Fresnel EQUAÇÃO (2.6) do enlace. Tais cálculos representam os parâmetros geométricos do enlace. Inicialmente, é calculada a distância entre as antenas em questão e para tal, calcula-se o Δ , que é a distância ortodrômica dada em graus. O cálculo de Δ é apresentado na EQUAÇÃO (2.1) e é dependente das posições geográficas, também em graus, das antenas nos pontos 1 e 2, que são representadas pelas variáveis Lat1 (Latitude em decimal da antena 1 em graus), Lat2 (Latitude em decimal da antena 2 em graus), Long1 (Longitude em decimal da antena 1 em graus) e Long2 (Longitude em decimal da antena 2 em graus).

$$\Delta = \arccos [\sin(\text{Lat}1)\sin(\text{Lat}2) + \cos(\text{Lat}1)\cos(\text{Lat}2)\cos(\text{Long}1 - \text{Long}2)] \quad (2.1)$$

Sendo:

Lat A e Long A - Representam as coordenadas geográficas da estação que se localiza mais a oeste; e,

Lat B e Long B - Representam as coordenadas geográficas da estação que se localiza mais a leste;

A partir do valor de Δ , é possível calcular a distância entre as antenas de forma efetiva, convertendo o valor dado em graus para quilômetros, unidade de distância mais usada. Esta conversão é feita seguindo a equação (2.2), na qual d é o valor da distância que se deseja calcular expresso em quilômetros. Esta conversão é possível pois é sabido que cada grau geográfico é equivalente a aproximadamente 111,2 km.

$$d = 111,2 \cdot \Delta \quad (2.2)$$

Com as localizações geográficas das estações e com as suas respectivas distâncias determinadas, é possível calcular qual o ângulo com relação ao norte geográfico cada uma das antenas deverá apontar para que fiquem uma de frente para a outra. Este cálculo denomina-se cálculo do azimute. A título de padronização de equações, o cálculo de azimute deve ser feito primeiramente para a antena de menor longitude, ou seja, a que está mais a oeste. Esta antena será então denominada de ponto A e a outra antena (mais a leste) de ponto B. É dado ao azimute do ponto A a variável Az_A , que representa o azimute do ponto A (Ponto de menor longitude) dado em graus e conseqüentemente, as coordenadas geográficas deste ponto também passam a ser Lat_A (dado em graus) e $Long_A$ (dado em graus). Analogamente, o azimute do ponto mais a leste (ponto B) é representado pela variável Az_B (dado em graus) e suas posições geográficas passam a ser Lat_B e $Long_B$, ambos expressos em graus. As EQUAÇÕES (2.3) e (2.4) apresentam os cálculos do azimute para os pontos ora explicados.

$$Az_A = \arccos\left(\frac{\sin(Lat_B) - \cos(\Delta)\sin(Lat_A)}{\sin(\Delta) \cos(Lat_A)}\right) \quad (2.3)$$

$$Az_B = 360 - \arccos\left(\frac{\sin(Lat_A) - \cos(\Delta)\sin(Lat_B)}{\sin(\Delta) \cos(Lat_B)}\right) \quad (2.4)$$

Para que o rádio enlace seja calculado é preciso saber qual a faixa de frequência f será utilizada pelo mesmo. A partir desta frequência, pode-se calcular o comprimento de onda λ dado em metros [m] ao se dividir a velocidade de propagação da onda c em metros por segundo [m/s] pela sua frequência f em [Hz], como mostra a EQUAÇÃO (2.5).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

De posse das informações do comprimento de onda λ e da distância ortodrômica d , é possível encontrar a área na qual a maior parte da potência irradiada pelas antenas se encontra. Esta área é chamada de primeira zona de Fresnel. Define-se como a área da primeira zona de Fresnel o corte transversal em um elipsoide. A zona obtida por este corte transversal é uma elipse cujos centros são as antenas. Sendo o raio maior muito maior do que o raio menor, pode-se aproximar o raio maior como sendo a distância d entre as antenas e o raio menor (r_{1m}) pode então ser calculado em metros como se segue na EQUAÇÃO (2.6).

$$r_{1m} = \sqrt{\frac{\lambda \times d \times 1000}{4}} \quad (2.6)$$

Após os cálculos geométricos do enlace, é necessário a definição dos outros fatores já elencados que supram as necessidades do projeto e contemplem as características específicas envolvendo a faixa de frequência utilizada, o tipo de terreno no qual se encontram as antenas e o ambiente no qual o sistema funcionará. Para que todos os aspectos físicos do projeto sejam abrangidos, a utilização de um programa computacional para projeto e simulação de rádio enlace é indispensável para minimização dos custos do projeto e esta ferramenta deve conter a modelagem do ambiente no qual o enlace será criado.

2.4 DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA

A escolha da frequência para o projeto do rádio enlace e as restrições ligadas a essa escolha representam um passo importante para a sua viabilização.

O QUADRO 1 apresenta as frequências que possuem viabilidade de uso para projetos de rádio enlace, apresentando também fatores importantes tais como: frequência central (f_0), largura de banda (BW) e banda passante que serão úteis para os passos futuros.

QUADRO 1 - FREQUÊNCIAS E SUAS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Faixa de Frequência [GHz]	Banda Passante [MHz]	Frequência Central f_0 [MHz]	Largura de Banda BW [MHz]
0,4	413,05-423		
	440-450		
1,5	1427-1517		
2	2025 – 2110	2032,5	14
	2200 - 2300		
4	3800 - 4200	3824,5	29
5	4400 - 4910	4430	40
6L	5925 - 6425	5945,2	29,65
6U	6430 - 7110	6440	10
		6440	20
		6440	30
		6460	40
7,5	7425 - 7725	7431,5	7
		7435	14
		7442	28
8	7725 – 7975	7747,7	29,65
	8025 - 8275		
8,5			
10,5	10150 – 10300	10152,25	35
	10500 - 10650		
11	10700 - 11700	10715	40
13	12700 – 13250	12751	28
15	14500 - 15350	14508	7
		14515	14
		14515	28
		14529	56
18	17700 – 18140	17713,75	13,75

Faixa de Frequência [GHz]	Banda Passante [MHz]	Frequência Central f_0 [MHz]	Largura de Banda BW [MHz]
	19260 - 19700	17727,5 17727,5	27,5 55
18	18600 – 18820	18642,5	5
	18920 - 19160	18702,5	5
		18762,5	5
23	21200 – 21800	21205	10
	22400 – 23000		
23	21800 – 22400 23000 - 23600	21808,5	7
		21952	7
		22099,5	7
		22235,5	7
		21808,7	10,5
		2952	10,5
		22099	10,5
		22235,5	10,5
23	21200 – 21550	21225	50
	22400 - 22750		
33	31800 - 33400	31829	28
38	37000 – 38248	37016	28
	38248 - 39500		
80	71000 – 76000	71125	62,5
	81000 - 86000		
90	92050 – 92500	92075	50
	93550 - 94000		
90	92600 – 93450	92625	50
	94100 - 94950		

FONTE: Adaptado de Anatel (2024)

Do QUADRO 1, tem-se que:

f_0 - Representa a *frequência central* [MHz];

BW - Representa a *largura de banda entre portadoras* [MHz].

Este trabalho explorará somente os aspectos ligados as frequências de 4 GHz, 5 GHz e 8 GHz. Tal escolha teve como limitação técnica o material de laboratório para a montagem do cenário de medidas na cidade de Pontal do Paraná.

Nestas faixas de frequências, o modo de propagação se dá em ondas terrestres, ou seja, ondas que se propagam através da superfície terrestre, na qual as principais componentes da onda recebida são as ondas diretas e refletidas no solo.

Existem também as ondas que sofrem espalhamento, difrações e refrações por obstáculos no trajeto, que se somam as duas componentes já citadas.

2.4.1 Determinação dos Planos de Frequência

Um plano de frequência desempenha papel fundamental na garantia de uma comunicação eficiente e confiável do enlace, levando em conta uma variedade de fatores técnicos e regulatórios. Assim, é essencial elaborar planos que otimizem o desempenho do sistema, visando a redução das interferências e assegurando uma melhor eficácia na transmissão de dados entre as estações do enlace Bertoni (2000) e Parsons (2000).

A recomendação F. 746-4 da ITU-R apresenta os critérios para fixação dos planos de frequência.

- **Banda de 4 GHz**

Esta banda pode ser organizada nos termos da Recomendação F. 382-7 da ITU-R ou da Recomendação F. 635-5 da ITU-R. Para esta análise será considerada a Recomendação F. 382-7 da ITU-R.

Esta banda está destinada a:

- Sistemas digitais de 2 x 34 Mbit/s, 2 x 45 Mbit/s, 140 Mbit/s e ainda as hierarquias digitais síncronas.

A banda de 4 GHz ocupa cerca de 400 MHz de sub-banda. A cada sub-banda correspondem 6 canais de ida e 6 canais de volta separados entre si de uma largura de banda de 29 MHz em um plano de frequências na qual a frequência central de cada canal é dada por:

- Semi banda inferior:

$$f_n = f_0 - 208 + 29 \times n \quad (2.7)$$

- Semi banda superior:

$$f_n = f_0 - 5 + 29 \times n \quad (2.8)$$

Sendo:

$$f_0 = 4003,5 \text{ MHz}$$

$$f_0 = 3824,5 \text{ MHz (Anatel)}$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

Se for necessário, é possível de se prever canais adicionais, intercalados entre os canais principais, com uma frequência central de 14,5 MHz abaixo da frequência central dos canais principais. Para o caso de rádio enlaces com 2 x 34 Mbit/s, 2 x 45 Mbit/s, 140 Mbit/s e ainda as hierarquias digitais síncronas tem que haver verificação antes de considerar canais adicionais.

- **Banda de 5 GHz**

Esta banda de 5 GHz pode ser organizada nos termos das Recomendações F. 746-4 e da Recomendação F. 1099-3 ambas do ITU-R.

A Recomendação F. 746-4. Apregoa que esta banda está destinada a:

- Sistemas digitais de 4 x 34 Mbit/s, 1 x 140 Mbit/s e modulação de 64-QAM.

A cada sub-banda correspondem 10 canais de ida e 10 canais de volta separados entre si de uma largura de banda de 28 MHz em um plano de frequências na qual a frequência central de cada canal é dada por:

- Semi banda inferior:

$$f_n = f_0 - 310 + 28 \times n \quad (2.9)$$

- Semi banda superior:

$$f'_n = f_0 + 2 + 28 \times n \quad (2.10)$$

Sendo:

$$f_0 = 4700 \text{ MHz}$$

$$f_0 = 4430 \text{ MHz (Anatel)}$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.$$

A Recomendação F. 1099-3 afirma que esta banda está destinada a:

- Sistemas digitais de 2 x 45 Mbit/s, 3 x 45 Mbit/s 1 x 155 Mbit/s e modulação de 512-QAM.

A cada sub-banda correspondem 8 canais de ida e 8 canais de volta separados entre si de uma largura de banda de 20 MHz em um plano de frequências na qual a frequência central de cada canal é dada por:

- Semi banda inferior:

$$f_n = f_0 - 185 + 20 \times n \quad (2.11)$$

- Semi banda superior:

$$f'_n = f_0 + 5 + 20 \times n \quad (2.12)$$

Sendo:

$$f_0 = 4720 \text{ MHz}$$

$$f_0 = 4430 \text{ MHz (Anatel)}$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.$$

- **Banda de 8 GHz**

Esta banda pode ser organizada nos termos da Recomendação F. 386-6 da ITU-R.

Esta banda está destinada a:

- Sistemas digitais, com taxas de transmissão de até 34 Mbit/s;
- Sistemas digitais de 2 x 8 Mbit/s.

A banda de 8 GHz ocupa cerca de 300 MHz, está subdividida em 6 sub-bandas o que corresponde a 6 canais de ida e 6 canais de volta separados entre si com uma largura de banda de 14 MHz cada uma das quais corresponde a uma frequência central f_0 , onde a frequência central de cada canal é dada por:

- Semi banda inferior:

$$f_n = f_0 - 108,5 + 14 \times n \quad (2.13)$$

- Semi banda superior:

$$f'_n = f_0 + 10,5 + 14 \times n \quad (2.14)$$

Sendo:

$$f_0 = 8387,5 \text{ MHz}$$

$$f_0 = 7747,7 \text{ MHz (Anatel)}$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

2.4.2 Canalização das Sessões Radioelétricas

Segundo Salema (2002), cada par emissor-receptor de uma ligação é costumeiramente chamado de seção radioelétrica e é composto pelo próprio meio e também pelo conjunto radiante formado por antenas, guias de onda, torre e cabos correspondentes aos sinais de ida e de retorno de uma ligação bidirecional. Tal compromisso para ser atendido necessita que:

- As seções radioelétricas correspondentes aos sinais de ida e de retorno de uma ligação bidirecional devam utilizar canais diferentes porque, embora seja teoricamente possível a utilização de um único canal, na prática é complicado de se realizar devido as interferências que isso produz.

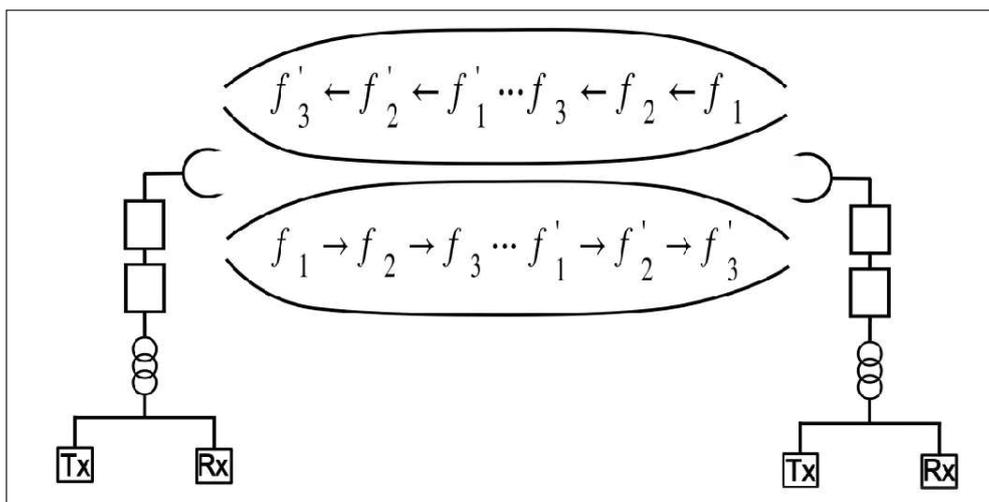
- As seções radioelétricas adjacentes, de uma mesma ligação, devem usar um canal de ida para o transporte da informação e um canal de volta para retorno da informação de modo a se evitar o risco de retroalimentação entre o emissor e o receptor nas estações transmissora e repetidora.

- As seções radioelétricas adjacentes, de uma mesma ligação, podem utilizar alternadamente o mesmo canal desde que os canais de ida de uma seção sejam os canais de retorno nas seções adjacentes e vice-versa.

- Os planos a duas frequências, nos quais as seções radioelétricas adjacentes usam alternadamente os mesmos canais de ida e de retorno, devem possuir bom espaçamento de modo que o sinal de ida (ou de retorno) de uma seção não interfira no sinal da próxima seção no mesmo canal.

Do exposto, a FIGURA 2 em função das restrições impostas para cada par transmissor/receptor sumariza a configuração de canalização que será adotada neste trabalho.

FIGURA 2 - CANALIZAÇÃO COM TRÊS FREQUÊNCIAS EM UM MESMO CANAL.



FONTE: O autor (2024)

Visando a otimização do espectro bem como a interligação dos sistemas sumariza-se no QUADRO 2 o número de canais disponíveis (N) e que podem ser utilizados em função das frequências de trabalho para a canalização.

QUADRO 2 - CANAIS DISPONÍVEIS PARA CANALIZAÇÃO

Faixa de Frequência [GHz]	Frequência Central f_0 [MHz]	Canal/Bloco	N	ED [MHz]	BW [MHz]
4	3824,5	CANAL	6	213	29
5	4430	CANAL	5	300	40
8	7747,7	CANAL	8	311,32	29,65

FONTE: O autor (2024)

Do QUADRO 2, tem-se:

N - Representa o número de canais de ida ou de volta;

ED - Representa o espaçamento duplex [MHz].

As frequências das portadoras ou frequências dos blocos dos canais são calculadas pelas expressões:

$$F_n = f_0 + BW \times (n - 1) \quad (2.15)$$

$$F'_n = f_0 + ED + BW \times (n - 1) \quad (2.16)$$

Sendo:

n - Representa o número do canal, começando em um e indo até o número máximo de canais (N) conforme a faixa;

F_n - Representa a frequência central do n-ésimo canal da metade inferior da faixa; e,

F'_n - Representa a frequência central do n-ésimo canal da metade superior da faixa.

Segundo Silvester e Ferrari (1983) e Sorrentino (1989) determinar o tipo de canalização a ser utilizado em um sistema significa, relacioná-lo as faixas de frequências de operação do mesmo com as sessões radioelétricas possíveis. Grosso modo, canalizar significa fragmentar uma frequência em várias partes com o intuito de aumentar a eficiência de ocupação do espectro rádio elétrico, ou seja, quanto melhor for à distribuição da canalização mais eficaz será a capacidade de informação transmitida. Para reduzir as interferências entre os canais de transmissão e recepção, existe um espaçamento entre a faixa que acolhe os canais de transmissão e a que acolhe os canais de recepção, também conhecidos como canais de ida e de volta. A disposição dos canais depende da forma em que os mesmos são ocupados, nos quais a quantidade de canais pode variar conforme o esquema de uso de frequências empregado. As principais disposições dos canais podem ser resumidas da seguinte forma:

- *Canalização sem Diversidade de Polarização* – representa o modo mais simplificado de realizar a disposição de canais. Tem como característica o uso menos eficiente do espectro (em termos de ocupação) em contrapartida, é uma disposição que apresenta baixa vulnerabilidade em relação às possíveis interferências produzidas no mesmo sentido de transmissão (polarizações iguais).

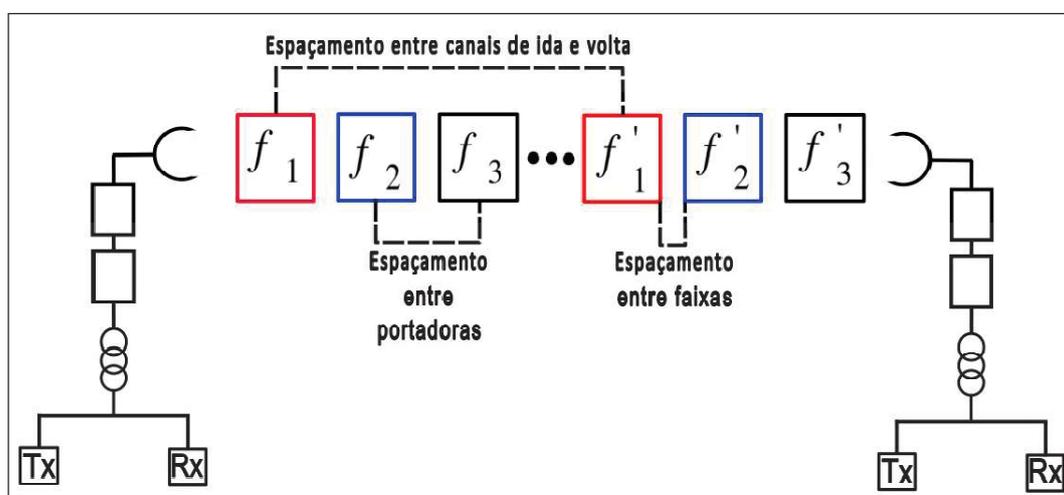
- *Canalização com Diversidade de Polarização* – esse tipo de disposição de canais minimiza ainda mais a vulnerabilidade a interferências que podem ocorrer em canais de um mesmo sentido, pois para este caso pode-se dispor os canais ímpares em uma determinada polarização e os canais pares em outra. Vale ressaltar, que tanto para este tipo de disposição quanto para a disposição anterior percebe-se que ambas possuem a mesma eficiência de ocupação espectral. Pois, este tipo de disposição, também não faz reuso de frequências.

- *Canalização Intersticial com Diversidade de Polarização* – para este tipo de disposição, os canais em ambas as polarizações são acomodados lado a lado e caso haja um deslocamento de um canal em relação a outro haverá ocupação com reuso de frequência.

- *Canalização com Reuso de Frequências e com Diversidade de Polarização* - este tipo de disposição representa uma solução de ajuste entre a robustez, interferência e eficácia de ocupação espectral. Quando não existe desalinhamento da polarização e as portadoras de ambas as canalizações se apresentam alinhadas, então o reuso de frequência é máximo.

Como a ideia é a de utilização de três frequências uma por canal, será utilizada a canalização do canal com o reuso de frequência e com diversidade de polarização que pode ser resumida na FIGURA 3.

FIGURA 3 - CANALIZAÇÃO COM REUSO DE FREQUÊNCIAS E COM DIVERSIDADE DE POLARIZAÇÃO



FONTE: O autor (2024)

2.4.3 Determinação dos Tipos de Serviços

Os tipos de serviços para qual o rádio enlace é concebido, possui relação direta com a frequência, frequência central, com a largura de banda e com a taxa de dados que será suportada pelo enlace, devendo cobrir toda a extensão deste.

Quase todos os serviços trafegando pelas redes de telecomunicações nos dias atuais, são serviços digitais. O QUADRO 3 a seguir apresenta (de modo não exaustivo) e a título indicativo, as capacidades de serviço disponíveis para as respectivas larguras de banda associada as frequências que serão utilizadas neste trabalho para implantação do enlace de rádio ponto multiponto.

QUADRO 3 - CAPACIDADE DE SERVIÇO DAS FREQUÊNCIAS ESCOLHIDAS.

Frequência [GHz]	Faixa [MHz]	Frequência Central (f_o) [MHz]	Largura de Banda BW [MHz]	Taxa (f_b) [Mbit/s]	Distância Mínima do Enlace [km]
4	3800-4200	3824,5	29	140 e 155	5
5	4400-4910	4430	40	140 e 155	5
8	7725-7925 8025-8275	7747,7	29,65	140 e 155	7

FONTE: O autor (2024)

2.4.4 Determinação da Eficiência Espectral (ee)

Apesar dos títulos indicativos mostrados no QUADRO 3, é oportuno esclarecer que quando se deseja aprimorar a capacidade de um enlace, ou seja, aumentar a sua eficiência espectral reduzindo produtos espúrios na saída do demulador pode-se colocar um filtro na saída deste que é chamado de filtro de Nyquist e determinado pela expressão:

$$lb_N = \frac{f_b}{2 \times \log_2(\sqrt{m})} = \frac{f_b}{\log_2(m)} \quad (2.17)$$

Sendo:

lb_N - Representa a *largura da banda do filtro de Nyquist* [MHz];

fb - Representa a *frequência do bit* (que neste caso representa a taxa de transmissão bruta do enlace) [MHz]; e,

m - Representa o *número da modulação* (m-QAM ou m-PSK).

Os usuais valores de m são expressos na QUADRO 4 abaixo.

QUADRO 4 - VALORES USUAIS DE M.

Tipos de Modulação	
Modulação em Quadratura m-QAM	4
	16
	32
	64
	128
	256
	512
	1024
	2048
	4096
Modulação em Fase m-PSK	2
	4
	8

FONTE: O autor (2024)

Logo, a largura de banda que define a ocupação do espectro é dada pela expressão:

$$lb = (1 + \beta) \times lb_N \quad (2.18)$$

Sendo:

lb - Representa a *largura da banda de ocupação espectral* para a frequência e taxa de transmissão considerados [MHz]; e,

β - Representa o *fator de excesso de banda do filtro de Nyquist* que comumente é considerado variando entre 0,1 e 0,5.

E, a largura de banda é função do tipo de modulação utilizada. A partir da recomendação ITU-R P.372-7 também é possível determinar a largura de banda ocupada pelo sinal em 99.9% da energia do pulso pela expressão.

$$lb = f_b + 2 \times 0,25 \times f_b \times 0,18 \quad (2.19)$$

A eficiência espectral pode então ser calculada pela relação:

$$ee = \frac{f_b}{lb} \quad (2.20)$$

2.4.5 Determinação do *Throughput*

O *Throughput*, considerado um dos indicadores da qualidade do rádio enlace, ou de quanto o rádio enlace como um todo será capaz de performar, depende basicamente dos seguintes fatores:

- Da qualidade do sinal transmitido;
- Da qualidade do sinal recebido;
- Do limiar de recepção entregue na ponta;
- Dos fatores geométricos e seus alinhamentos.

2.5 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA

Os principais parâmetros de potência que devem ser calculados e considerados quando do projeto de um rádio enlace são:

- Potência transmitida (Pt) [dBm];
- Potência efetiva isotropicamente radiada (E.i.r.p) [dBm];
- Potência recebida (Pr) [dBm];
- Limiar de recepção (LR) [dBm];
- Margem de desvanecimento (MD) [dB]; e,
- Margem de desvanecimento por interferência (MDI) [dB].

2.5.1 Potência Transmitida (P_t) [dBm]

A potência transmitida é determinada em função dos seguintes parâmetros:

- Da frequência de operação do enlace;
- Do comprimento do enlace; e
- Do tipo de serviço que se deseja;

O nível máximo de potência na saída do transmissor para cada frequência é regulamentado pela ANATEL e encontra-se sumarizado no QUADRO 5.

QUADRO 5 - RESUMO DOS PRINCIPAIS NÍVEIS DE POTÊNCIA.

Frequência [GHz]	Faixa de Operação [MHz]	Potência Máxima na Saída do Transmissor [dBm]
4	3800 a 4200	35
5	4400 a 4910	37
8	7725 a 7925 e 8025 a 8275	37

FONTE: O autor (2024)

Ressalta-se que a Anatel fixa o nível máximo de potência na saída do transmissor, mas omite-se com relação aos níveis mínimos.

2.5.2 Potência Efetiva Isotrópicamente Radiada (E.i.r.p) [dBm]

A potência efetiva ou energia irradiada por uma antena pode ser facilmente calculada em [dBm]. O E.i.r.p deve ser calculado toda vez que se liga um transmissor a uma antena, de modo a se determinar qual a real potência que a antena está transmitindo. Isto se deve ao fato de que parte da potência transmitida se perde nos cabos além do restante da potência sofrer atenuação devido ao ganho da antena. Este cálculo pode ser realizado pela Expressão: (Neto, 1999).

$$E.i.r.p = P_t - Aca + G_t \quad (2.21)$$

Sendo:

$E.i.r.p$ - Representa a potência efetiva isotropicamente irradiada [dBm] ou [dBW];

P_t - Representa a potência no transmissor ou a energia irradiada pela antena [dBm];

A_{ca} - Representa a atenuação total do cabo na transmissão [dB]; e,

G_t - Representa o ganho de transmissão da antena [dBi].

2.5.3 Potência Recebida (P_r) [dBm]

O nível de recepção nominal na antena de recepção ou potência recebida, representa o nível de sinal na entrada do receptor não considerando possíveis desvanecimentos ou possíveis multi trajetos. Este cálculo pode ser realizado utilizando-se a Equação: (Neto, 1999).

$$P_r = P_t - A_t + G_T + G_R \quad (2.22)$$

Sendo:

P_r - Representa o nível de recepção nominal, a potência no receptor ou a energia recebida pela antena [dBm];

P_t - Representa a potência no transmissor ou a energia irradiada pela antena [dBm];

G_T - Representa o ganho das antenas de transmissão [dBi];

G_R - Representa o ganho das antenas de recepção [dBi]; e

A_t - Representa a atenuação total do enlace [dB].

2.5.4 Limiar de Recepção (LR) [dBm]

o limiar de recepção ou potência limiar (I_r) representa o valor limite do nível de sinal admissível na entrada do receptor. O limiar de recepção também representa uma das fronteiras entre os sistemas de transmissão e os sistemas de comunicação, pois em função dos valores obtidos para o LR pode-se ter a certeza de que o rádio

enlace projetado atenderá as necessidades. Em suma, o limiar de recepção é uma conjugação ou um equacionamento entre a frequência de operação do enlace, da sua banda, da potência máxima transmitida em função da frequência e do tipo de modulação. Se todos esses fatores conjugados estiverem em concordância o rádio enlace não sofrera com quedas de sinal que o tornarão inviável. Aplicando a legislação vigente baseada nos Requisitos técnicos e operacionais para uso das faixas de radiofrequências associadas ao serviço limitado privado - Ato nº 915, de 01 de fevereiro de 2024 da Anatel para as principais frequências de uso restrito sumariza-se seus indicativos no QUADRO 6. (Anatel, 2024).

QUADRO 6 - PATAMARES DOS LIMIARES DE RECEPÇÃO

Frequência [GHz]	Faixa de Operação [MHz]	Tipo de Modulação	Taxa (Mbit/s)	Limiar de Recepção [dBm]
4	3800 a 4200	4 PSK ou 4 QAM e 64 QAM	140 e 155	$BER \leq 10^{-3} = -72$ dBm $BER \leq 10^{-6} = -70,5$ dBm
5	4400 a 4910	8 PSK ou 64 QAM	140 e 155	$BER \leq 10^{-3} = -78$ dBm $BER \leq 10^{-6} = -75$ dBm
8	7725 a 7925 e 8025 a 8275	4 PSK ou 4 QAM	140 e 155	$BER \leq 10^{-3} = -78$ dBm

FONTE: Adaptado de Anatel (2024)

Do QUADRO 6 desprende-se que quanto maior for a modulação, maior será a capacidade de tráfego e conseqüentemente, menor será o limiar de recepção. Todos os valores apresentados são a título indicativo e foram extraídos das normas vigentes.

2.5.5 Margem de Desvanecimento (MD) [dB]

Representa uma margem de segurança para o sistema. Ela correlaciona à potência recebida com a potência limiar do sistema, ou seja, quanto mais próximos os níveis estiverem um do outro, maior será a degradação do sinal, Gomes (2013).

$$MD = P_r - LR \quad (2.23)$$

Sendo:

P_r – Representa a potência recebida em [dBm]; e,

LR – Representa a potência limiar do sistema em [dBm].

2.5.6 Margem de Desvanecimento por Interferência

A margem de desvanecimento por Interferência (MDI) correlaciona a margem de desvanecimento (MD) subtraindo do mesmo 1 dB (valor comumente adotado como referência para cálculos de enlace sob linha de visada) de degradação devido a interferência de outros sistemas. Para este cálculo se utiliza a seguinte equação, GOMES (2013):

$$MDI = MD - 1 \quad (2.24)$$

2.6 DETERMINAÇÃO DO RUÍDO

O ruído representa um sinal que pode vir a degradar um sistema de transmissão. Eles são gerados por uma ampla gama de diferentes fontes, que podem ser naturais ou artificiais. Um sistema de transmissão deve ter um nível de ruído o mais baixo possível para que o desempenho do enlace não fique degradado. Os principais tipos de ruído são:

- Ruído externo que é considerado como uma propriedade do canal;
- Ruído interno que é originado no próprio equipamento constitutivo do sistema.

De modo sumarizado desprende-se que:

- Os tipos mais comuns de ruído externo são: os ruídos com origem em outros equipamentos, o ruído atmosférico e o ruído espacial;
- Os tipos mais comuns de ruído interno são: o ruído térmico, o ruído *de eco* e o ruído interferente (mesma polarização e polarização cruzada).

Os principais parâmetros de ruído que devem ser calculados e considerados quando do projeto de um rádio enlace são:

- Relação sinal ruído - (RSR) [dB];
- Fator ruído - (FR);
- Cálculo do valor de sistema – (VS) [dB];
- Determinação do ruído térmico – (RT) [dBm] ou [dBW];
- Determinação do ruído térmico para 50% e 80% do tempo – (RT) [dBm];
- Cálculo do ruído de eco (RE) [dB];
- Determinação da relação portadora ruído – (C/N) [dB];
- Ruído interferente de polarização paralela – (RIPP) [dB];
- Ruído interferente de polarização cruzada – (RIPC) [dB]; e,
- Determinação do ruído total (RT) [dBm].

2.6.1 Relação Sinal/Ruído (RSR) [dB]

A relação sinal/ruído (RSR) expressa em [dB] representa uma relação logarítmica entre:

- A potência transmitida nos terminais do transmissor com uma potência de ruído de natureza térmica.
- A potência recebida nos terminais do receptor com uma potência de ruído de natureza térmica.

Logo a expressão que caracteriza esta relação em [dB] para as duas situações é:

$$RSR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{total}}{P_{ruído}} \right) \quad (2.25)$$

Sendo:

P_{total} - Representa a potência total ou a potência transmitida [dBm];

$P_{ruído}$ - Representa a potência de ruído [dBm].

A potência de ruído pode ser expressa pela relação:

$$P_{ruído} = N_0 \times BW$$

A relação RSR deve ser calculada tanto na entrada quanto na saída do sistema para cada *link* em estudo. Logo a Potência total a bem da verdade significa:

P_{total} - Representa a potência total na entrada determinada como sendo a potência máxima recebida;

P_{total} - Representa a potência total na saída determinada como sendo a potência máxima transmitida;

2.6.2 Fator de Ruído (FR)

o fator de ruído representa uma relação entre a relação sinal ruído na entrada pela relação sinal na saída. quanto menor o fator de ruído, melhor, pois indica que o sinal desejado é mais forte em relação ao ruído.

Para determinar o Fator de Ruído, utiliza-se a seguinte relação:

$$FR = \left(\frac{RSR_{entrada}}{RSR_{saída}} \right) \quad (2.26)$$

2.6.3 Ganho do sistema ou valor do sistema (VS) [dBm]

O valor de sistema é uma medida que representa o desempenho global de um sistema de transmissão calculado em função de diversos parâmetros inerentes ao sistema. A expressão que caracteriza esta relação em [dBm] será:

$$VS = P_t - FR - 10 \log \frac{K \times T \times BW}{1 \times 10^{-3}} + 20 \log \frac{lb}{f_0} + 139 + Z \quad (2.27)$$

Sendo:

VS – Representa o ganho do sistema [dBm];

P_t – Representa a potência transmitida [dBm];

FR – Representa o fator de ruído do receptor;

K – Representa a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K];

T – Representa a temperatura de ruído [K];

BW - Representa a largura de banda do canal do enlace [MHz];

Z – Representa um fator de correção que depende de outros parâmetros do sistema, como perdas de cabo e ganho da antena [dB];

lb – Representa a *largura da banda de ocupação espectral* para a frequência e taxa de transmissão considerados [MHz]; e,

f_0 – Representa a frequência central [MHz].

Pode-se sumarizar, através do QUADRO 7, os valores de T como segue:

QUADRO 7 – VARIAÇÕES DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO MEIO

Condição	Temperatura T [K]	Temperatura T [°C]
Temperatura Ambiente	273 - 303	0 - 30
Temperatura de Operação	273 - 353	0 - 80
Temperatura Marítima	273 - 298	0 - 25

FONTE: O Autor (2024)

Os valores de temperatura são apenas uma referência geral e podem não refletir precisamente as condições do local específico onde o enlace estará operando. Vale ressaltar que, para áreas costeiras, as temperaturas podem ser moderadas devido à influência do oceano, mas também podem ser afetadas por fatores como a temperatura, a presença de ventos e a latitude.

2.6.4 Nível de ruído térmico (RT) [dBW]

Através da EQUAÇÃO (2.28) é possível calcular o nível de ruído térmico (RT) de um receptor em um sistema de transmissão. Através do ruído térmico é possível estimar a qualidade do sinal recebido bem como, a sensibilidade do receptor que é a menor potência de sinal que o receptor pode detectar com uma taxa de erro específica. Miyoshi (2006).

$$RT = -174 + 10 \log BW + FR \quad (2.28)$$

Sendo:

- RT - Representa a temperatura de ruído do receptor em [dBW], (dBW = dBm + 30);
- BW - Representa a largura de banda [MHz];
- FR - Representa o fator de ruído;
- 174 - Representa uma constante do nível de ruído térmico em dBm a 290 K.

2.6.5 Contribuição do Ruído Térmico para 50% e 80% do tempo ($RT_{50\%}$ / $RT_{80\%}$) [dBm]

O cálculo desse parâmetro é necessário para prever o nível de ruído térmico quando o sistema opera em apenas 50% do tempo. Logo a expressão que caracteriza esta relação em [dBm] será:

$$RT_{50\%} = RT \times 0,5 \quad (2.29)$$

Para o cálculo do ruído térmico em 80% do tempo a expressão que caracteriza a relação em [dBm] é:

$$RT_{80\%} = RT \times 0,8 \quad (2.30)$$

2.6.6 Ruído de Eco (RE) [dB]

Representa um ruído interno que é inerente ao sistema, ao mesmo tempo em que considera a atenuação nos guias de onda, a perda de retorno do sinal da antena, o número de canais que estão sendo considerados bem como a largura de banda destes, a velocidade de trânsito do sinal nos cabos e o VSWR (relação de onda estacionária da antena). Os exemplos de valores de ruído de eco significativos são:

-20 dB - Nível de ruído de eco considerado aceitável para a maioria dos sistemas.

-10 dB - Nível de ruído de eco que pode começar a afetar a qualidade da comunicação.

0 dB - Nível de ruído de eco que é igual à potência do sinal transmitido.

O ruído de eco pode ser determinado pela expressão em [W]:

$$RE_W = P_t \times d \times G_t \times G_r \times A_r \times \left(\frac{\sigma}{4\pi d^2} \right) \quad (2.31)$$

Sendo:

G_t - Representa o ganho da antena transmissora [dBi];

G_r - Representa o ganho da antena receptora [dBi];

A_r - Representa a área efetiva da antena receptora [m²];

d - Representa a distância entre as torres consideradas [m].

σ - Representa o coeficiente de reflexão que neste caso é adimensional, pois representa a razão entre a potência refletida e a potência incidente. Como a antena é metálica $\sigma = 1$;

Para que se tenha o valor do ruído de eco em [dB], faz-se:

$$RE = 10 \times \log(RE_W) \quad (2.32)$$

2.6.7 Relação Portadora/Ruído (C/N) [dB]

A relação portadora/ruído (C/N), expressa em decibéis (dB), é uma medida que compara o nível do sinal da portadora de comunicação ao nível do ruído presente no sistema de transmissão. Essa relação é crucial na avaliação da qualidade do sinal de comunicação, pois indica o quão bem o sinal é detectável em relação ao ruído de fundo.

Uma relação C/N mais alta significa que o sinal da portadora é mais forte em comparação ao ruído, o que geralmente resulta em uma melhor qualidade de comunicação. Por outro lado, uma relação C/N mais baixa indica que o sinal da portadora está mais próximo do nível de ruído, o que pode resultar em uma comunicação menos confiável ou até mesmo na incapacidade de detectar o sinal.

Logo, a relação portadora/ruído (C/N) expressa uma possível degradação de sinal em relação ao nível de sinal de máximo tolerado. Esta relação se traduz por:

$$\frac{C}{N} = \log(\text{E. i. r. p} + 20 \times \log\left(\frac{\lambda}{3,14 \times d}\right) + A_t + G_r + A_{cb} - 10 \log(K \times T)) \quad (2.33)$$

Sendo:

K – Representa a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ [J/K];

T – Representa a temperatura equivalente do sistema [K];

C/N – Representa a relação portadora ruído em [dB];

G_r – Representa o ganho da antena receptora [dB];

A_{cb} – Representa a atenuação no cabo coaxial da estação [dB];

λ – Representa o comprimento de onda [m];

A_t – Representa a atenuação total do enlace [dB].

2.6.8 Ruído interferente por polarização paralela (RI_{PP}) [dB] e ruído interferente por polarização cruzada (RI_{PC}) [dB]

É um tipo de ruído interno produzido pelo ganho das antenas, pela sua discriminação angular, pela atenuação nos cabos e nos conectores em função da potência transmitida e da atenuação no espaço livre. Existem dois modos de produção do ruído interferente: o ruído interferente produzido por polarização paralela e o ruído interferente por polarização cruzada.

O ruído interferente por polarização paralela (RI_{pp}) pode ser calculado pela expressão:

$$RI_{PP} = \log 20 + P_r - RI_{\emptyset} \quad (2.34)$$

$$RI_{\emptyset} = P_t + G_t + G_r - A_{el} - A_{cabos} - A_{conectores} - D_{\emptyset} \quad (2.35)$$

Sendo:

P_t - Representa a potência transmitida [dBm];

P_r - Representa a potência recebida [dBm];

G_t - Representa o ganho da antena transmissora [dB];

G_r - Representa o ganho da antena receptora [dB];

A_{el} - Representa a atenuação em espaço livre [dB];

A_{cabos} - Representa a atenuação nos cabos da estação transmissora [dB];

D_{θ} - Representa a discriminação angular da antena [dB]; e,

$A_{conectores}$ - Representa a perda nos conectores da estação transmissora A [dB].

• O ruído interferente por polarização cruzada pode ser calculado pela expressão (RI_{PC}) [dB] é então:

$$RI_{PC} = 20 + P_r - I_{PC} \quad (2.36)$$

$$I_{PC} = RI_{\theta} - R_{PC} \quad (2.37)$$

Sendo:

RI_{pc} - Representa a polarização cruzada da antena [dB].

2.6.9 Ruído Total (R_{total}) [dBm]

Para o caso dessa dissertação o ruído total do sistema levou em consideração para a sua determinação: O fator de ruído, o ruído térmico, o ruído de eco e o ruído interferente. As relações de sinal/ruído e portadora ruído foram tomadas apenas como indicadores da qualidade do sistema. Vale ressaltar que os parâmetros de ruído são geralmente associados aos equipamentos terminais do sistema (amplificadores, filtros, osciladores) e não propriamente ao sistema em si. No entanto, é sabido que sim é possível existir ruídos que deteriore a potência do sinal transmitido. Por isso que, além da determinação dos diversos parâmetros de ruído determinou-se também as relações do ruído com o próprio sistema. As resoluções ITU-R SM.1753-2 e ITU-R SM.2055, impõem que o patamar de ruído total (soma de todos os ruídos considerados) do sistema, independentemente do número de estações não deva ultrapassar mais do que 35% do valor da potência recebida pelo sistema, o que já representa um valor bastante elevado. O ruído total, para o caso dessa dissertação, pode ser determinado pela expressão:

$$R_{total} = FR + RT + RE + RI_{PP} + RI_{PC} \quad (2.38)$$

Sendo:

FR - Representa o fator de ruído;

RT - Representa o ruído térmico [dB];

RE - Representa o ruído de eco [dB];

RI_{PP} - Representa o ruído interferente por polarização paralela [dB]; e,

RI_{PC} - Representa o ruído interferente por polarização cruzada [dB];

2.7 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE

A determinação da confiabilidade de um *link* impacta na escolha dos equipamentos mais adequados para atender às necessidades do sistema.

Os principais parâmetros de confiabilidade que devem ser calculados e considerados quando do projeto de um rádio enlace são:

- Determinação da inoperância do sistema (IS) [%];
- Determinação da inoperância por desvanecimento não seletivo (PI) [%];
- Determinação da inoperância por desvanecimento seletivo (PS) [%];
- Determinação da inoperância em minutos por ano (PI μ) [%];
- Confiabilidade total do sistema (C) [%];
- Determinação do Tempo total de indisponibilidade (TTI) [%]; e,
- Disponibilidade do sistema.

2.7.1 Inoperância do Sistema (IS) [%]

A inoperância de um sistema de transmissão, dentro de um contexto específico, como o caso de um rádio enlace, é frequentemente abordada em documentos de orientação, padrões e recomendações técnicas que tratam de aspectos específicos da operação e do planejamento de sistemas de transmissão. A Recomendação ITU-R P.530-14 fornece orientações para o cálculo de propagação de ondas eletromagnéticas, o que é relevante para entender e prever a qualidade do sinal em sistemas de transmissão. No entanto, esta recomendação não fornece uma

expressão para a determinação da IS. Como a inoperância do sistema baseia-se na estimativa da probabilidade de inoperância, diversos métodos foram desenvolvidos para a determinação desta, mesmo quando o enlace fica submetido à condições anômalas de propagação. Logo para a determinação do IS deve-se dispor do fator geoclimático (representa a monitoração do nível do sinal recebido por um período em relação a uma região geográfica de interesse), que é determinado pela expressão:

$$IS = 10^{-4,4-0,0027 \times dN_1} \quad (2.39)$$

Sendo:

dN_1 – Representa o valor do gradiente de refatividade [K/m].

Para a determinação do coeficiente de refatividade será utilizada a expressão:

$$dN_1 = \frac{k}{T \times (\sqrt{2 \times R \times h_1} + h_1^2)} \quad (2.40)$$

Sendo:

k - Representa o coeficiente de refração terrestre (4/3);

h_1 - Representa a altura real da antena na torre de transmissora em [m];

R - Representa o raio da terra (6371 km); e,

T - Representa a temperatura de ruído [K].

2.7.2 Probabilidade de Inoperância em Razão do Desvanecimento não Seletivo (PI) [%]

A probabilidade de inoperância (PI) em razão do desvanecimento não seletivo representa a chance de um sistema de comunicação falhar devido a flutuações aleatórias no sinal recebido, independentemente da modulação utilizada. É uma métrica importante para avaliar a confiabilidade de *links* de comunicação em ambientes com desvanecimento tal como é o caso aqui presente. A probabilidade de inoperância pode ser determinada como segue.

$$PI = IS [\%] \times (100 \times 10^{\frac{-MD}{10}}) [\%] \quad (2.41)$$

Sendo:

MD – Representa a margem de desvanecimento que quantifica a robustez do sistema contra o desvanecimento. Uma margem de desvanecimento maior indica um sistema mais resiliente a flutuações no sinal [dB]; e,

IS – Representa a inoperância do sistema em [%]. Define o nível de inaceitabilidade do sistema. Ou seja, qual a porcentagem de falhas que o sistema pode tolerar antes de ser considerado inoperante.

A probabilidade de desvanecimento não seletivo em sistemas de transmissão é conhecida como desvanecimento lento e corresponde a pequenas variações na intensidade do sinal.

2.7.3 Probabilidade de Inoperância em razão do Desvanecimento Seletivo (PS) [%]

É um tipo de desvanecimento causado pelos múltiplos percursos que o sinal sofre durante a sua trajetória, cuja ocorrência está associada com as condições geoclimáticas (reflexões, refrações entre outros) da região assim como da geometria do sistema. Nos sistemas de transmissão este tipo de desvanecimento é conhecido como desvanecimento rápido, pois o mesmo ocorre em frações de segundos. Logo a expressão que caracteriza esta relação é a seguinte:

$$PS = 4,3 \times \eta \times Sw \times \tau_m^2 \quad (2.42)$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,2 \times IS^{0,75}) \quad (2.43)$$

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} \quad (2.44)$$

Sendo:

η – Representa o fator de ocorrência de propagação;

τ_m – Representa o atraso médio entre dois percursos em [ns];

d – Representa a distância do enlace [km];

S_w – Representa a área de assinatura;

2.7.4 Probabilidade do período de Inoperância total em minutos por ano (PI_μ) [%]

Considerando a *Internacional Telecommunication Union* (2012) em sua Recomendação ITU-R P.530-14, a probabilidade de inoperância total é a soma das probabilidades de inoperância em virtude do desvanecimento não seletivo e em virtude também do desvanecimento seletivo. Logo a expressão que caracteriza esta relação em [dB] será,

$$PI_\mu = (PI + PS) \times 10^2 \text{ [%]} \quad (2.45)$$

Sendo:

PI – Representa a Probabilidade de Inoperância em razão do desvanecimento não seletivo [%]; e,

PS – Representa a Probabilidade de Inoperância em razão do desvanecimento seletivo [%].

2.7.5 Confiabilidade (C) [%]

Uma vez verificado que o enlace concebido atende aos critérios de inoperância, pode-se então proceder-se ao cálculo da confiabilidade. A confiabilidade representa a sumarização de praticamente todos os procedimentos acima elencados. A confiabilidade pode ser determinada segundo a expressão MKONGWA (2014):

$$C = (100 - PI_\mu) \text{ [%]} \quad (2.46)$$

Sendo:

PI_μ - Representa a probabilidade do período de inoperância total em minutos por ano [%].

2.7.6 Tempo total de indisponibilidade (TTI)

A probabilidade total de indisponibilidade representa o total das probabilidades de inoperância no sistema, ou sob o ponto de vista técnico, a porcentagem de defeitos nos equipamentos terminais dependendo das condições de funcionamento deles. Essa probabilidade pode ser determinada pela seguinte expressão Venkateswara (2022):

$$TTI = IS + PI + PS + PI_{\mu} [\%] \quad (2.47)$$

Sendo:

IS - Representa a inoperância do sistema [%];

PI - Representa a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo [%];

PS - Representa a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo [%]; e,

PI_μ - Representa a probabilidade do período de inoperância total [%].

2.7.7 Disponibilidade do Sistema

A disponibilidade do sistema é estabelecida pela NORMA ITU-T G25. Como um dos objetivos específicos desse trabalho é a avaliação do impacto da degradação do sinal tendo a chuva sobre o *link* como uma das principais métricas, a seguir apresenta-se uma análise rigorosa sobre este efeito. A análise em suma consiste em:

1. Seleção da frequência de operação;
2. Determinação da largura de banda;
3. Determinação do tipo de modulação;
4. Determinação da potência máxima na saída do transmissor;
5. Determinação do E.i.r.p;
6. Determinação do limiar de recepção;
7. Determinação do ganho da antena de transmissão máximo;
8. Determinação do ganho da antena de recepção máximo;
9. Determinação da atenuação no espaço livre;
10. Determinação da atenuação nos cabos de transmissão e recepção;

11. Determinação da atenuação nos circuitos de derivação;
12. Determinação do diâmetro efetivo da gota de chuva;
13. Determinação da atenuação unitária da polarização utilizada (vertical ou horizontal);
14. Determinação da atenuação devido à chuva;

Todos os parâmetros anteriores tendo sido definidos executa-se então os cálculos da potência recebida e do limiar de recepção e na sequência verifica-se a disponibilidade do *link* Nakamura (2022).

$$P_r \leq LR \text{ Considerar o enlace indisponível} \quad (2.48)$$

Ou

$$P_r \geq LR \text{ Considerar o enlace disponível} \quad (2.49)$$

A determinação dos valores que permitam o uso das Expressões (2.48) e (2.49) resultam no cumprimento de uma métrica fundamental para o projeto de um rádio enlace.

Sendo:

LR – Representa o limiar de recepção [dBm]; e

Pr – Representa a potência recebida [dBm].

3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO E EFEITOS DAS ATENUAÇÕES SOBRE O LINK

3.1 INTRODUÇÃO

Após análise preliminar dos principais aspectos do rádio enlace pretendido, passa-se a etapa de simulação de propagação da onda eletromagnética imersa no ambiente pretendido. Para que esta simulação seja possível, é necessário modelar o ambiente para que, de forma matemática, possa-se determinar qual a perda de potência que ocorre em determinado trecho no percurso da onda. Esta modelagem gera os modelos de propagação que são utilizados para previsão com baixo custo operacional de como a onda eletromagnética se comportará no ambiente. Alguns dos modelos mais utilizados e com ampla divulgação na literatura técnica são os modelos de Lee, Okumura, Hata, COST-231- Walfisch-Ikegami, entre outros.

Genericamente, os modelos de propagação calculam a perda de potência por unidade de distância percorrida pela onda, entretanto, modelos simples se utilizam de valores médios para grandes áreas classificando cada área por tipo de terreno, como urbano ou rural e outros modelos, mais precisos utilizam dados mais complexos do ambiente, como presença de árvores, altura de edifícios, distância entre edifícios, largura de ruas, tipos de vegetação entre outros. Cada tipo de modelo tem sua função, e podem prever o comportamento da onda eletromagnética tanto para ambientes internos quanto externos, e cada um deles tem sua precisão, benefícios e custos.

Por existirem inúmeros modelos, não é possível se determinar sempre qual é o melhor modelo a se utilizar para cada situação sem a realização de testes. Como a maioria dos modelos de propagação foram criados para uso geral, casos muito específicos acabam por não serem contemplados da melhor forma possível e por este motivo, a criação de modelos de propagação específicos para uma determinada área são um ótimo recurso para determinação de perda de sinal em locais mais críticos, tal como a área em estudo pretendida Anastassiou (2014). Tanto para a criação quanto para a utilização de modelos de propagação, as informações sobre a área na qual o enlace estará inserido são de suma importância. Estas informações são as chamadas base de dados da região.

Para que um modelo de propagação possa realizar os cálculos de perdas por unidade de distância percorrida pela onda, dados sobre o ambiente são necessários, como mencionado anteriormente. Estes dados recebem o nome de base de dados da região, a qual contém informações relativas à geografia do local, com dados georreferenciados (com posicionamento em latitude e longitude) de altitude do terreno e também a respeito da morfologia do ambiente.

A morfologia do ambiente se refere ao tipo de cobertura da região, se existem prédios ou casas, lagos ou árvores e assim por diante. Os dados morfológicos podem ser apresentados como uma média da região por grandes áreas e classificados como urbano, suburbano e rural, entre outros, ou ainda apresentar dados específicos sobre elementos encontrados no local. A base de dados de uma região é de crucial importância para o funcionamento de uma simulação por modelos de propagação e cada modelo tem uma base de dados específica para realizar corretamente os cálculos de perdas de potência de sinal.

3.2 ATENUAÇÕES SOBRE O *LINK*

3.2.1 Introdução

As atenuações sobre o *link* são desafios a serem transpostos na medida em que estas podem afetar a qualidade e a confiabilidade das transmissões. O uso de técnicas de diversidade de espaço ou o dimensionamento adequado da potência do sinal, podem ser empregadas para lidar com os efeitos da atenuação sobre um *link* e então garantir um desempenho adequado do sistema em condições climáticas adversas. A chuva, por exemplo, pode causar atenuações no sinal de rádio devido à absorção e dispersão das ondas sendo especialmente relevante em frequências mais altas, onde as gotas de chuva têm um impacto significativo na propagação do sinal. Em Tertuliano (2017) e Otobo (2021) as expressões que caracterizam as atenuações sobre um rádio enlace são detalhadas. Como a proposta dessa dissertação é de uma análise da degradação do sinal radioelétrico devido as chuvas, atenção especial será dada a este parâmetro.

Para uma melhor compreensão dos efeitos relativos à atenuação sobre um link, os seguintes parâmetros serão calculados:

- Atenuação em espaço livre (A_{el}) [dB];
- Atenuação devido à chuva (A_{ac}) [dBm];
- Atenuação nos cabos (A_{ca}) [dB];
- Atenuação nos guias de onda (A_{go}) [dB];
- Atenuação nos circuitos de derivação (A_{cdtx}) [dB];
- Perda por obstrução (A_{tob}) [dB];
- Area de assinatura (S_w) [dB];
- Atenuação por gases atmosféricos (A_{ga}) [dB]; e,
- Atenuação total (A_t) [dB].

3.2.2 Atenuação em espaço livre (A_{el}) [dB]

A forma mais comum e conhecida de propagação das ondas de rádio é conhecida como a propagação em espaço livre. O espaço livre é um meio que permite a propagação da onda eletromagnética com pouquíssimas perdas e sobretudo é um meio homogêneo e isotrópico e onde, portanto, existe uma ausência de qualquer objeto que provoque problemas de refração, reflexão, difração, absorção ou espalhamento. O melhor exemplo de espaço livre é então o vácuo ou uma atmosfera ideal. Logo, para uma dada distância em quilômetro e para uma frequência dada em giga-hertz tem-se:

$$A_{el} = 92,44 + 20 \times \log(d) + 20 \times \log(f_0) \quad (3.1)$$

Sendo:

A_{el} – Representa a atenuação no espaço livre [dB];

f_0 - Representa a frequência central [MHz]; e,

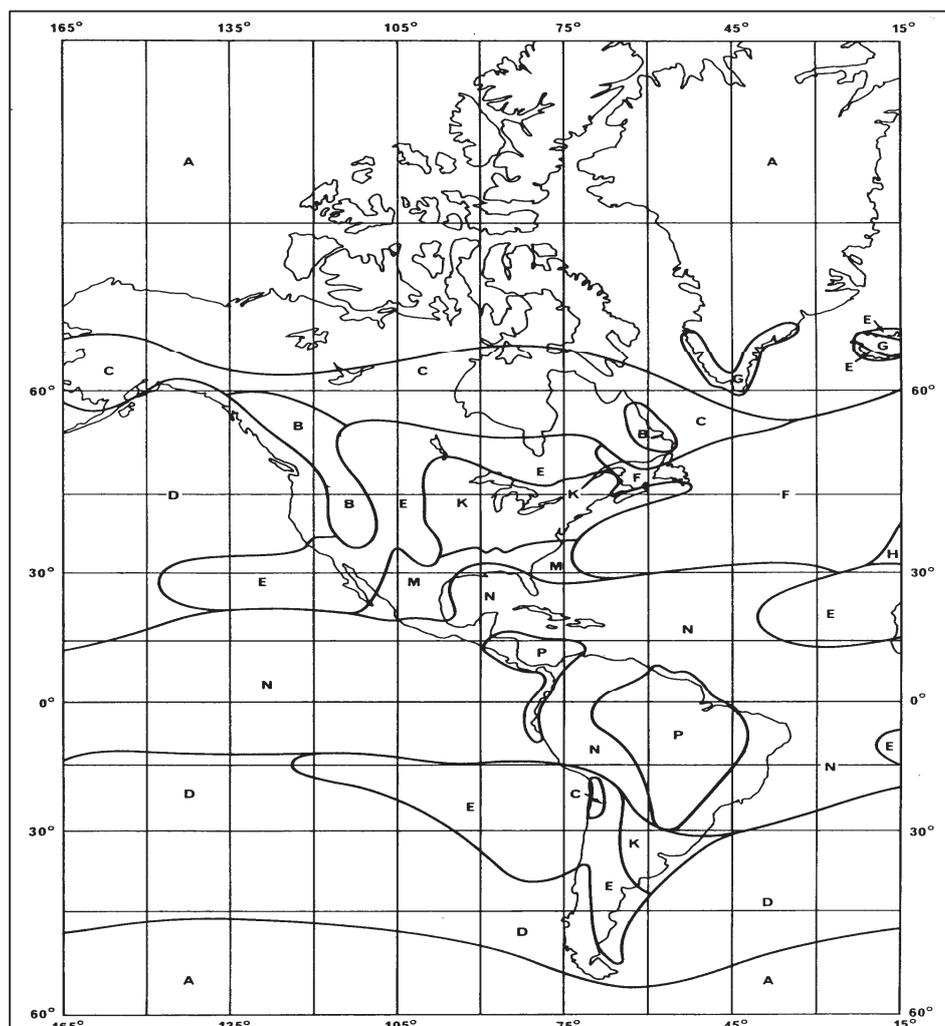
d - Representa o comprimento total do enlace [km];

3.2.3 Determinação da atenuação devido à chuva (A_{ac}) [dBm]

Atenuação devido à chuva em enlaces de rádio frequência costuma ser um fator crítico quando ele opera em altas frequências. A chuva pode vir a degradar de modo sensível a confiabilidade de um enlace. O ITU-R através da recomendação ITU-

R 837-1 apresenta a taxa pluviométrica mundial. O Brasil, conforme pode ser observado na FIGURA 4 está localizado nas regiões N e P. Nessa dissertação será considerado o índice pluviométrico apenas da região P que abrange o sul do país que é a área de abrangência e de estudo deste trabalho. Para esta região a taxa pluviométrica pode variar de 12 [mm/h], 34 [mm/h], 65 [mm/h], 95 [mm/h], 105 [mm/h], 145 [mm/h], 200 [mm/h] e 250 [mm/h] dependendo da região em que se encontre o enlace. Estes dados da ITU-R 837-1 foram calculados para 0,01% do ano ou cerca de 53 minutos de chuva no mês. Para se evitar a indisponibilidade do rádio enlace pela chuva, esta deve ser calculada para todas as taxas pluviométrica e para todas as larguras de banda da frequência escolhida.

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO MUNDIAL



FONTE: International Telecommunication Union (1992-1994)

Uma vez que se disponha da taxa pluviométrica, da frequência de operação e do tipo de polarização do enlace, é possível determinar a atenuação devido à chuva.

$$A_{ac} = Y_R \times d_{eff} \quad (3.2)$$

Sendo:

- A_{ac} - Representa a atenuação devido à chuva [dBm];
- d_{eff} - Representa o diâmetro efetivo da gota de chuva [mm]; e,
- Y_R - Representa a atenuação unitária [dB/km].

Os valores de d_{eff} e de Y_R : são obtidos pelas seguintes relações:

$$d_{eff} = \frac{1}{1 + \frac{d}{35 \times e^{(-0,015 \times R_{0,01})}}} \times d \quad (3.3)$$

Sendo:

- d - Representa o comprimento total do enlace [km]; e,
- $R_{0,01}$ - Representa a precipitação pluviométrica para 0,01% do tempo anual [mm/h]*;

*Nota:

Para valores de precipitações maiores do que 100 [mm/h] recomenda-se o uso de 100 [mm/h] segundo a recomendação ITU-R 837-1.

O cálculo da atenuação unitária (Y_R) é definido segundo a polarização utilizada:

- Para uma polarização vertical a atenuação unitária Y_R [dB/km] é expressa por:

$$Y_R = P_V \times R_{0,01}^{\alpha_V} \quad (3.4)$$

Sendo:

P_V - Representa um fator de correção tabelado da frequência por modelagem da forma da gota de chuva ou do orvalho, da temperatura, da distribuição da chuva ou da velocidade da gota.

- Para uma polarização horizontal a atenuação unitária Y_R [dB/km] é expressa por:

$$Y_R = P_H \times R_{0,01}^{\alpha_H} \quad (3.5)$$

Sendo:

P_H - Representa um fator de correção da frequência por modelagem da forma da gota de chuva ou do orvalho, da temperatura, da distribuição da chuva ou da velocidade da gota.

O QUADRO 8 sumariza as correções para frequências usuais do enlace segundo a recomendação ITU-R 837-1.

QUADRO 8 - PARÂMETROS DE CHUVA SEGUNDO A RECOMENDAÇÃO ITU-R 837-1.

Frequência	P_V	P_H	α_V	α_H
4	5,91E ⁻⁴	6,5E ⁻⁴	1,075	1,121
5	1,55E ⁻³	1,75E ⁻³	1,265	1,308
8	3,95E ⁻³	4,54E ⁻³	1,310	1,327

FONTE: O Autor (2024)

Quanto mais elevada for a frequência de operação do enlace, maior será a atenuação devido à chuva.

3.2.4 Atenuação nos cabos (Aca) [dB]

A atenuação sofrida pelo cabo de interligação entre o transmissor até a antena é fornecida pelo fabricante. Na presente dissertação foi utilizado o cabo coaxial RG213 para as três distintas frequências. As especificações do cabo serão fornecidas no Capítulo 4.

3.2.5 Atenuação nos guias de onda (A_{go}) [dB]

A atenuação máxima sofrida pelos guias de onda também é fornecida pelo fabricante. Na presente dissertação foi considerado que o valor máximo, comumente utilizado na literatura para esta atenuação sofrida pelos guias de onda não seja superior a 4 dB.

3.2.6 Atenuação nos circuitos de derivação (A_{cdtx}) [dB]

A atenuação máxima sofrida pelos circuitos de derivação é também fornecida pelo fabricante. Na presente dissertação foi considerado que o valor máximo, comumente utilizado na literatura para esta atenuação sofrida pelos guias de onda não seja superior a 4 dB.

3.2.7 Perda por obstrução (A_{tob}) [dB]

A perda por obstrução acontece toda vez em que o relevo da região analisada impeça a passagem do sinal. Nesses casos, deve-se utilizar as equações de Fresnel para a liberação do sinal do enlace. Na presente dissertação tal como será mostrado no Capítulo 4, não existe obstrução de sinal devido a planicidade da região sendo então este termo equivalente à 0 dB na presente dissertação.

3.2.8 Determinação da área de assinatura (S_w) [dB]

A área de assinatura representa um fator importante quando do cálculo de um rádio enlace. O cálculo da área de assinatura de um sistema de transmissão nada mais é do que a quantificação da robustez do equipamento de recepção relativo as distorções provocadas pelos desvanecimentos seletivos. A equação geral que define este parâmetro é padronizado pela ITU-R F.1093. Para este cálculo se utiliza a seguinte equação:

$$S_w = \frac{(S_m + S_{nm})}{2} \quad (3.6)$$

$$S_m = \frac{(\lambda_m \times B_s \times 10^{-3})}{\tau_r} \quad (3.7)$$

$$S_{nm} = \frac{(\lambda_{nm} \times B_s \times 10^{-3})}{\tau_r} \quad (3.8)$$

Sendo:

S_m – Representa a área de assinatura para fase mínima;

S_{nm} – Representa a área de assinatura para fase não mínima;

λ_m – Representa a profundidade média para fase mínima;

λ_{nm} – Representa a profundidade média para fase não mínima;

B_s – Representa a largura de faixa das áreas de assinatura em [MHz]; e,

τ_r – Representa o atraso de referência em 6,3 [ns].

3.2.9 Atenuação por gases atmosféricos (A_{ga}) [dB]

A atenuação pelos gases atmosféricos é expressa pela relação:

$$A_{ga} = (A_{as} + A_{au}) \times d \quad (3.9)$$

Sendo:

A_{as} - Representa a atenuação específica do ar seco/oxigênio em [dB/km]; e,

A_{au} - Representa a atenuação específica do ar húmido/vapor d'água em [dB/km];

d - Representa o comprimento total do enlace [km].

$$A_{as} = \left(7,19 \times 10^{-3} \frac{6,09}{f_0^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f_0 - 57)^2 + 1,50} \right) (f_0^2 \times 10^{-3}) \quad (3.10)$$

$$A_{au} = \left(0,050 + 0,0021p + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,50} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3} \right) \times (p \times f^2 \times 10^{-4}) \quad (3.11)$$

Sendo:

p - Representa a densidade do vapor de água em grama/m³ geralmente $p=7,5$ g/m³; e,

f_0 - Representa a frequência central [MHz].

3.2.10 Determinação da Atenuação Total (At) [dB]

A atenuação total líquida representa a soma de todas as atenuações sofridas pelo sinal devido a vários fatores. A atenuação total líquida [dB] é determinada pela Expressão:

$$At = Ael + Aac + Aca + Ago + Acctx + Atob + SW + Aga \quad (3.12)$$

Sendo:

At - Representa a atenuação total [dB];

Ael - Representa o valor da atenuação no espaço livre [dB];

Aac - Representa o valor da atenuação devido à chuva [dBm];

Aca - Representa o valor da atenuação nos cabos [dB];

Ago - Representa o valor da atenuação nos guias de onda no lado transmissor [dB]*¹;

Acctx - Representa o valor da atenuação nos circuitos de derivação [dB]*²;

Atob - Representa o valor da perda por obstrução (se houver) [dB]*³;

SW - Representa a área de assinatura [dB]; e,

Aga - Representa a atenuação por gases atmosféricos [dB].

* Nota 1:

- O rádio enlace está sendo projetado para operar em três frequências distintas, logo as atenuações provocadas pelos cabos e/ou guias de onda são atenuações que para efeito de concepção do rádio enlace possuem valores referenciais diferentes. Para efeito de simplificação e considerando-se que é um recurso recorrente na prática, será adotado nesse trabalho o valor de 4 dB para esta atenuação.

* Nota 2:

- A perda no circuito de derivação (A_{cd}) tanto na transmissão quanto na recepção depende de fatores tais como: Quantidade de amplificadores utilizados no projeto, quantidade de filtros, quantidade de circuladores; quantidade de transmissores, quantidade de receptores e da qualidade do cabo coaxial. Logo, torna-se extremamente complicado o cálculo deste tipo de atenuação. Portanto, em projetos de rádio enlace é comum estimar-se esta perda total em 4 dB (incluindo tanto os circuitos de transmissão quanto os circuitos de recepção ($A_{cd_{tx}}$) e ($A_{cd_{rx}}$)).

* Nota 3:

- O rádio enlace projetado possui uma topografia plana onde nem as árvores presentes no local de análise e nem as construções ultrapassam a altura de 35 m. Do exposto, não existe a necessidade de determinação da perda por obstrução.

3.3 PARTICULARIZAÇÃO DOS MODELOS

Como anteriormente dito, o objetivo deste trabalho é o da caracterização das interferências e análise da degradação do sinal radio elétrico em meio marinho. Logo, para a realização do trabalho, foi necessário a busca de modelos de propagação para a utilização na região litorânea do estado do Paraná. Os seguintes modelos responderam a esse critério Guinot (2010) e Guanrong (2014):

- Modelo de Okumura-Hata: Modelo básico e amplamente usado para modelagem de propagação em áreas urbanas e suburbanas. Ele leva em consideração a distância entre a estação transmissora e receptora, a frequência de operação e a altura das antenas para calcular perdas de propagação, mas não particulariza o meio marinho especificamente.

- Modelo de Weissberger-Seidel: Esse modelo leva em consideração a influência do ambiente costeiro na propagação das ondas de rádio. Ele considera o efeito da reflexão e difração em superfícies de água salgada.

- Modelo ITU-R P. 1546: Este modelo, desenvolvido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) foi especificamente projetado para levar em consideração a propagação em ambientes marítimos e regiões litorâneas. Ele considera parâmetros como a rugosidade da superfície da água e a altura das antenas.

- Modelo de Lee: Este modelo considera o impacto das reflexões de múltiplos caminhos em ambientes costeiros. Ele é usado para prever a cobertura de sinais de rádio em áreas próximas ao mar.

- Modelo de Longley-Rice: Este é um modelo de propagação de rádio que também é usado em regiões litorâneas. Ele considera uma variedade de fatores, incluindo refração devido à água e a influência da umidade marítima na propagação do sinal, a topografia, a condutividade do solo e as características da superfície da água.

- Modelo de Stanford University Interim (SUI): Este modelo foi desenvolvido para prever a propagação de sinais em ambientes urbanos, suburbanos e rurais, mas também pode ser aplicado em regiões costeiras.

- Modelo de Epstein-Peterson: Este modelo é conhecido por abordar efetivamente a propagação de ondas de rádio sobre a água e em ambientes marítimos, considerando elementos como a salinidade da água e a influência da refração atmosférica sobre a propagação.

Ainda dentro dos objetivos pretendidos na busca dos modelos mais adequados, foram estabelecidos critérios mais rigorosos para a escolha. Portanto, foram realizadas análises detalhadas que levaram em consideração as seguintes variáveis:

- Frequência da transmissão: Em função das três frequências que seriam utilizadas, o modelo teria que proporcionar uma propagação em linha de visão para atenuar os efeitos de reflexão e de difração.

- Topografia local: Apesar da topografia no litoral ser relativamente plana, o modelo a ser utilizado deveria levar em consideração a presença de restinga, árvores, lagos, edifícios litorâneos no todo ou em parte desses fatores.

- Condições atmosféricas: As condições climáticas locais em todo o litoral do Paraná incluem muito nevoeiro, chuvas abundantes e valores elevados de umidade. Logo, o modelo deveria levar em consideração o todo ou parte desses fatores.

- Altura das antenas: A altura das antenas transmissoras e receptoras nas torres, por critério de economicidade não devem ultrapassar a altura de 35 m. Logo, o modelo a ser escolhido deveria levar em consideração tal aspecto.

- Tipo de ambiente costeiro: A rugosidade da superfície da água, a salinidade da água e a vegetação nas áreas costeiras podem afetar a propagação das ondas de rádio, então, era fundamental que tais fatores fossem considerados pelo modelo.

- Objetivos do sistema de comunicação: Dependendo do uso pretendido da rede de comunicação (por exemplo, celular, rádio, Wi-Fi), os requisitos de cobertura e capacidade podem variar e isso influencia a escolha do modelo.

Logo, devido a imposição desses fatores limitantes, os modelos que melhor responderam aos critérios foram o modelo de Weissberger, o modelo de Lee e o modelo de Epstein-Peterson. No entanto, nenhum dos critérios acima elencados é coberto integralmente pelos modelos, o que levou a proposta de criação e de apresentação de um modelo específico denominado de modelo Pompilio, que baseado nas características dos modelos apresentados, insere os fatores de chuva e vegetação em sua análise do comportamento do sinal. Os resultados advindos desse modelo são então comparados com modelos que responderam ao critério. Essa também representa uma contribuição científica desse trabalho.

3.3.1 O modelo de propagação de Weissberger

O fenômeno da propagação em ambientes vegetados é de grande relevância prática e é reconhecido como um problema de propagação extremamente complexo. O processo de propagação de ondas envolve fenômenos de absorção,

espalhamento, atenuação e despolarização, e esses elementos estão interligados por fatores tais como a frequência de operação, condições atmosféricas, altura da antena, propriedades elétricas do meio, densidade e morfologia dos espécimes vegetais.

Vogel e Goldhirsh (1986), por exemplo, demonstraram que uma árvore isolada pode atenuar em até 10 dB o campo eletromagnético.

Weissberger (1982) propôs um modelo de perda de propagação conhecido como modelo exponencial modificado, a partir de sua análise do decaimento exponencial na faixa de frequência variando entre 230 MHz a 96 GHz. Segundo ele, quando um sinal se propaga por uma área coberta por vegetação, a perda total de propagação, $Pl_{Tl} [dB]$, pode ser obtida como: Silva (2018), Azevedo, J. A (2017), Meng, Y. S. (2010) e Castellanos, G. (2017).

$$Pl_{Tl}[dB] = Pl_{el-weiss}[dB] + Pl_{Weiss}[dB] \quad (3.13)$$

Sendo:

$Pl_{el-weiss}[dB]$ - Representa a perda de propagação em espaço livre [dB]; e

$Pl_{Folhagem}[dB]$ - Representa a perda de propagação devido à folhagem [dB].

Onde valor do $Pl_{el-weiss}[dB]$ é obtido da seguinte expressão:

$$Pl_{el-weiss}(dB) = 32.5 + 20 * \log(f_0) + 20 * \log(d) \quad (3.14)$$

Sendo:

f - Representa a frequência central [MHz]; e

d - Representa a distância entre as torres consideradas [km].

O valor de $Pl_{WEIS}[dB]$ é obtido pela expressão:

$$Pl_{WEIS}(dB) = \begin{cases} 0.45 f_0^{0.284} (d_f) & \text{para } 0 \leq d_f \leq 14m \\ 1.33 f_0^{0.284} (d_f)^{0.588} & \text{para } 14 \leq d_f \leq 400m \end{cases} \quad (3.15)$$

Sendo:

d_f - Representa a profundidade da folhagem ao longo do caminho de visão direta (LOS) em [m]; e

f_0 - Representa a frequência central em [MHz].

No entanto, para um meio marinho com restingas consideráveis deve-se introduzir uma constante de ajuste de extensão e profundidade da folhagem denominado de K_{df} .

Portanto a expressão da perda total por propagação se transforma em:

$$Pl_{Tl}(dB) = 32.5 + 20 * \log(f_0) + 20 * \log(d) + \begin{cases} 0.45f_0^{0.284}(K_{df}(d_f)) & \text{para } 0 \leq d_f \leq 14m \\ 1.33f_0^{0.284}(K_{df}(d_f))^{0.588} & \text{para } 14 \leq d_f \leq 400m \end{cases} \quad (3.16)$$

O valor de K_{df} foi simulado iterativamente usando-se o *Solver* do Microsoft Excel, que é um *software* para programação matemática integrado à planilha eletrônica que resolve problemas de programação linear. Sendo então um suplemento do Excel.

3.3.2 O modelo de propagação de LEE

O modelo de propagação de Lee (Lee, 1997) é uma abordagem empírica para a previsão de perda de percurso em sistemas de comunicação móvel e foi desenvolvido por William C.Y. Lee. Este é um modelo particularmente útil para prever a intensidade do sinal em ambientes urbanos e dentre as suas características básicas destacam-se:

Perda de Propagação Básica: Esta é a perda de propagação do sinal medida ou calculada em um espaço livre ou em condições ideais, e é usada como referência para ajustes baseados em condições reais de propagação.

Fatores de Correção: O modelo de Lee introduz vários fatores de correção que ajustam a perda de propagação básica para acomodar influências específicas do ambiente, como:

- **Correção para área urbana ou suburbana:** Dependendo se a área é urbana densa, urbana normal, suburbana ou rural, um fator de correção específico é aplicado.
- **Correção devido a condições do terreno:** Como a morfologia do terreno afeta a propagação do sinal, o modelo de Lee inclui correções para terreno plano, ondulado ou montanhoso.

- **Correção por tipo de antena:** Diferentes tipos de antenas (como direcional ou omnidirecional) impactam a propagação do sinal, o que é considerado no cálculo da perda.

Faixas de Frequência e Distâncias: O modelo de Lee é aplicado de maneira diferente dependendo da faixa de frequência do sinal e da distância entre o transmissor e o receptor.

Modelagem de Desvanecimento e Sombreamento: O modelo também considera o desvanecimento e sombreamento, que são variações na intensidade do sinal causadas por obstáculos físicos e pela variação topográfica, incorporando esses efeitos no cálculo da intensidade do sinal recebido.

O modelo de propagação de Lee apesar do seu extensivo uso, por diversos conceptores de sistema, não é um modelo de propagação fácil de ser utilizado ao mesmo tempo em que ele é pouco adaptável fora das condições para as quais ele foi projetado. O uso do modelo de Lee requer o uso de *softwares* que exaustivamente faça simulações de suas variáveis básicas como, por exemplo, correções dos *tilt* de antenas e da perda por propagação dentro da área de assinatura de operação do enlace.

As principais expressões que caracterizam esse modelo são apresentadas a seguir Rivera (2015):

Perda de Propagação Básica $Pl_{el_Lee}[dB]$, que pode ser inicialmente estimada pela equação de perda de espaço livre. Vale ressaltar que a perda por propagação de Lee difere da perda por propagação de Weissberger por um fator K.

$$Pl_{el_Lee}[dB] = 20 \times \log_{10}(d) + 20 \times \log_{10}(f_0) + \Lambda \quad (3.17)$$

Sendo:

Pl_{el_Lee} - Representa a perda de propagação em espaço livre [dB];

d - Representa a distância do link em [km];

f_0 - Representa a frequência central [MHz]; e,

Λ - Representa uma constante que inclui o termo,

$$A = 20 \times \log_{10} \left(\frac{4 \times \pi}{c} \right) \quad (3.18)$$

Sendo:

c - Representa a velocidade da luz 3×10^8 [m/s].

Dependendo do tipo de ambiente, pode ser que sejam necessários correções no $PL_{el}[dB]$. Tais ajustes específicos dependem do tipo de ambiente (urbano, suburbano, rural), tipo e altura de antena, entre outros. Embora não exista uma forma universal para essas correções, elas podem ser expressas genericamente como:

$$PL_{el_Lee}[dB]_{corrigido} = PL_{el_Lee}[dB] + A_a + A_t + A_m \quad (3.19)$$

Sendo:

A_a - Representa as correções devido ao ambiente;

A_t - Representa as correções devido ao tipo de antena; e,

A_m - Representa as correções devido ao tipo de antena.

Em síntese, os efeitos da vegetação e da água do mar em um sistema de comunicação influenciam o canal de comunicação do *link*.

3.3.3 O modelo de propagação de Epstein-Peterson

O modelo de propagação Epstein-Peterson é um modelo empírico capaz de prever a atenuação do sinal eletromagnético podendo ser utilizado em serviços terrestres ponto-área na faixa de frequência de 30 MHz a 6 GHz ou em serviços ponto multiponto até 8,5 GHz. Este modelo é uma ferramenta valiosa para o planejamento e otimização de redes de radiodifusão, de comunicação móvel e/ou outros sistemas de comunicação terrestre Abdulrasool (2017).

Dentre sua especificidade ou característica destaca-se o fato de o modelo Epstein-Peterson levar em conta o perfil do terreno ao longo do caminho de propagação proporcionando previsões mais precisas do que modelos genéricos, além de versatilidade pois o modelo pode ser aplicado em uma variedade de ambientes, incluindo ambientes marinhos, ambientes rurais, áreas suburbanas e urbanas. O

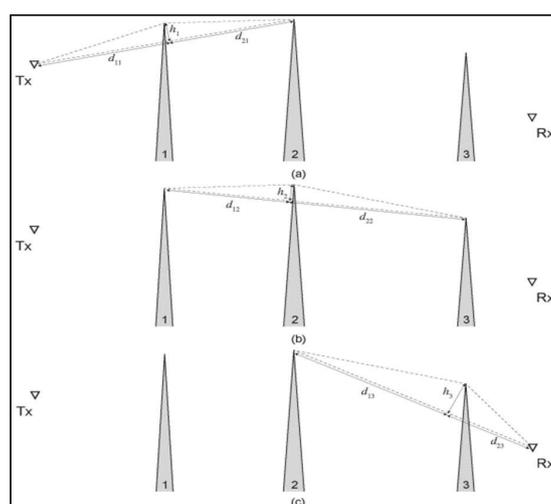
modelo é considerado um modelo preciso sendo relativamente simples o seu uso, com várias ferramentas e *softwares* disponíveis para simplificar os cálculos.

Além disso, dentre suas inúmeras aplicações destacam-se, por exemplo, o fato de que em seu uso o posicionamento das antenas pode ser otimizado, fato este que melhora a cobertura dos transmissores dentro do sistema. Este modelo também é muito utilizado para previsão de cobertura em redes de comunicação móvel o que pode fornecer uma boa qualidade do sinal, além de poder ser utilizado para avaliar a interferência entre diferentes sistemas de comunicação.

Dentre algumas das limitações do modelo pode-se citar que apesar de ele ser um modelo preciso ele é extremamente dependente da qualidade dos dados sobre o terreno e quanto mais plano for o terreno mais adequado torna-se este modelo.

A principal característica do modelo de Epstein-Peterson é que ele considera vários obstáculos no percurso de propagação. Nesse modelo, a atenuação de cada obstáculo é calculada individualmente pelos métodos tradicionais e, depois, somadas para obter a atenuação total. Por exemplo, na FIGURA 5(a), primeiramente, é calculada a atenuação entre o transmissor e o obstáculo 2 por obra do gume 1, $f(vx) = f(d_{11}, d_{21}, h_1)$. Em seguida, é encontrada a atenuação entre 1 e 3 causada pelo gume 2, $f(v2) = f(d_{12}, d_{22}, h_2)$, como ilustra a FIGURA 5(b). Finalmente, é calculada a atenuação entre 2 e o receptor pela difração no gume 3, $f(v3) = f(d_{13}, d_{23}, h_3)$, como mostra a FIGURA 5(c).

FIGURA 5 - MODELO DE EPSTEIN-PETERSON



Fonte: Vasconcelos (2017)

Segundo Vasconcelos (2017) as equações que caracterizam esse modelo são:

$$v = h \sqrt{\frac{2 \times (d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (3.20)$$

Sendo:

- v - Representa a atenuação devido a presença de campo elétrico em [dB];
- d - Representa a distância entre transmissor e receptor em [km];
- d_1 - Representa a distância entre transmissor até o obstáculo 1 em [km];
- d_2 - Representa a distância entre transmissor até o obstáculo 2 em [km];
- h - Representa a altura efetiva da antena transmissora em [m];

A perda por difração (L_{GF}) é calculada pela Equação:

$$L_{GF} = -20 \log_{10} \left| \left(\frac{1+j}{2} \right) \times \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(v) \right] \right\} \right| \quad (3.21)$$

Sendo:

- L_{GF} - Representa a perda por gume de faca [dB];
- $S(v)$ - Representa a integral seno de Fresnel;
- $C(v)$ - Representa a integral cosseno de Fresnel;
- (v) - Representa o parâmetro de difração de Fresnel.

A integral seno e cosseno de Fresnel é dada respectivamente por:

$$S(v) = \int_0^v \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} \times t^2 \right) dt \quad (3.22)$$

$$C(v) = \int_0^v \text{cos} \left(\frac{\pi}{2} \times t^2 \right) dt \quad (3.23)$$

Para perfis de terreno planos com torres muito próximas umas das outras podem ocorrer aumento da degradação do sinal por distorções de sinal devido à proximidade. Para se evitar que tal fato ocorra recomenda-se o controle da potência de transmissão e, assim, garantir a concordância com uma solução satisfatória.

3.3.4 O modelo de propagação de Pompílio

O modelo de propagação Pompílio é um modelo empírico capaz de prever a atenuação do sinal eletromagnético em regiões litorâneas. Este modelo considera para sua análise os efeitos dos parâmetros da chuva incidentes sobre o *link*, a vegetação de restinga, a salinidade do meio dentre outros fatores.

O desenvolvimento empírico desse modelo deu-se devido a necessidade de previsão da atenuação da onda eletromagnética dentro de um contexto específico onde os modelos de Weissberger, Lee e Epstein-Peterson não foram capazes de modelar todas as variáveis necessárias. Logo, a modelagem proposta nessa dissertação foi criada de modo a considerar não apenas as atenuações produzidas pela chuva como também a morfologia da região de estudo que para o presente caso é o meio marinho.

O modelo Pompílio também é vantajoso pela sua simplicidade e pela capacidade de adaptar-se a diferentes condições ambientais através de ajustes e fatores de correção. Contudo, como um modelo empírico, sua aplicabilidade e precisão podem variar dependendo do contexto específico e das condições de propagação.

O modelo Pompílio fornece a perda de propagação do sinal, como função de vários parâmetros. No entanto, alguns parâmetros devem ser calculados recursivamente: frequência f_0 [MHz], distância das estações d [km], altura da antena transmissora h_1 [m], altura da antena receptora h_2 [m] e índice pluviométrico. A fórmula do modelo permite ajustar os resultados das medições nos seguintes intervalos de valores: $4 \leq f \leq 8$ GHz, $1 \leq d \leq 20$ km, $25 \leq h \leq 30$ m. Logo, a fórmula padrão para o fator de ajuste ao ambiente em decibéis em uma região litorânea é:

$$\psi = 10 \log\left(\frac{P_t}{E.i.r.p}\right) + 20 \log\left(\frac{h_1}{h_{ideal}}\right) + 10 \log\left(\frac{h_2}{h_{ideal}}\right) + (G_{tx} + G_{rx}) + \Delta A_{ac} + PL((d)) + 10y \log(d) - 30 \log\left(\frac{f_0}{920}\right) + X_\sigma \quad (3.24)$$

Sendo:

ψ - Representa o fator de ajuste ao ambiente [dB];

P_t - Representa a potência transmitida [dBm];

$E.i.r.p$ - Representa a potência efetiva isotropicamente radiada [dB];

h_1 - Representa a altura real da antena na torre de transmissão [m];

h_{ideal} - Representa a altura ideal da antena na torre de transmissão [m];

h_2 - Representa a altura real da antena na torre de recepção [m];

h_{2p} - Representa a altura ideal da antena na torre de recepção [m];

G_{tx} - Representa o ganho da antena de transmissão [dB];

G_{rx} - Representa o ganho da antena de recepção [dB];

ΔA_{ac} - Representa a atenuação a média do índice pluviométrico [dB];

$PL((d))$ - Representa a perda de retorno para uma distância de referência [dB];

X_σ - Representa uma variável aleatória gaussiana de média zero (em dB) com desvio padrão σ . Ou seja, esta variável descreve uma probabilidade estatística de perda de sinal devido à chuva [dB];

σ - Representa o desvio padrão, ou seja, a largura da distribuição normal. Quanto maior o desvio padrão, mais espalhada estará a distribuição, ou seja, os valores de X_σ poderão variar mais em torno da média de zero dB.;

y - Representa o expoente da perda de retorno;

$$y = k_1 + k_2 + \Delta hm + w \quad (3.25)$$

Sendo:

y - Representa não apenas o expoente da perda de retorno, mas é através desse parâmetro que se faz toda a correlação com a morfologia do sistema.

$$k_1(f_0) = \frac{\Delta hm \times (f_0) - 2,27}{0,2} \quad (3.26)$$

$$k_2(f_0) = -0.00237f_0^2 + 0,82f_0 + 3,35w \quad (3.27)$$

$k_1 = 3,89$ para 4 e 5 GHz

$k_2 = 2,89$ para 4 e 5 GHz

$k_1 = 4,89$ para 8 GHz

$k_2 = 2,61$ para 8 GHz

f_0 - Representa a frequência central [MHz];

Δhm - Representa a altura média da vegetação [m];

w - Representa o tamanho médio das folhas da vegetação sobre o terreno[m];

A dependência do alcance do sinal foi apresentada em função da área de assinatura e da frequência de operação. Na EQUAÇÃO (3.24) esse resultado foi expresso por $30 \log \left(\frac{f_0}{850} \right)$.

Entender como a vegetação atua sobre o *link* é um fator bastante relevante, pois esta pode vir a ocasionar importantes alterações no sinal Meng (2010) e Adewumi (2018). A perda por difração sobre a vegetação é dada por:

$$\chi_{veg} = -22,4 - 10 \times \log(w) + 10 \times \log(f_0) + 20 \times \log(\Delta hm) + \chi_{corr} \quad (3.28)$$

Sendo:

χ_{veg} - Representa a perda por difração sobre a vegetação [dB];

w - Representa o tamanho médio das folhas da vegetação sobre o terreno[m];

f_0 - Representa a frequência central [MHz];

Δhm - Representa a altura média da vegetação [m];

χ_{corr} - Representa o fator de correção devido a incidência do sinal sobre a vegetação;

Sendo:

$$\chi_{corr} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{para } 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 + 0,114(\varphi - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3.29)$$

A perda devido a múltiplas difrações e reflexões sobre a vegetação é calculada pela seguinte expressão Bartzoudis (2017):

$$\chi_{m\acute{d}r} = L_{dvt} - FD_a + FC_d \times \log(d) + FC_f \times \log(f) - 12 \times \log(\zeta) \quad (3.30)$$

Sendo:

$\chi_{m\acute{d}r}$ - Representa a perda devido a múltiplas difrações e reflexões sobre a vegetação [dB];

L_{dvt} - Representa a densidade da vegetação no trajeto percorrido pelo sinal [m²/ha];

FC_a - Representa o fator de correção da dependência de L_{dvt} com a altura da antena na torre;

FC_d - Representa o fator de correção da dependência de L_{dvt} com a distância;

d - Representa a distância entre as torres [km];

FC_f - Representa o fator de correção da dependência de L_{dvt} com a frequência;

f - Representa a frequência de operação [MHz];

ζ - Representa a distância média entre a torre de transmissão ao local de maior densidade de vegetação [m]

Uma vez determinados e analisados os principais parâmetros que afetam diretamente o sinal radioelétrico em um meio marinho, apresenta-se então através da EQUAÇÃO (3.31) a fórmula que expressa o modelo empírico de Pompilio.

$$Pl_{Pompilio} = \psi + A_{el} + \chi_{veg} + \chi_{mdr} \quad (3.31)$$

Sendo:

$Pl_{Pompilio}$ - Representa a perda por propagação [dB];

ψ - Representa o fator de ajuste ao ambiente [dB];

A_{el} - Representa a atenuação em espaço livre [dB];

χ_{veg} - Representa a perda por difração sobre a vegetação [dB];

χ_{mdr} - Representa a perda devido a múltiplas difrações e reflexões sobre a vegetação [dB];

O Capítulo 4 a seguir apresenta o estudo de caso aonde serão aplicados todos os conceitos precedentes.

4 ESTUDO DE CASO

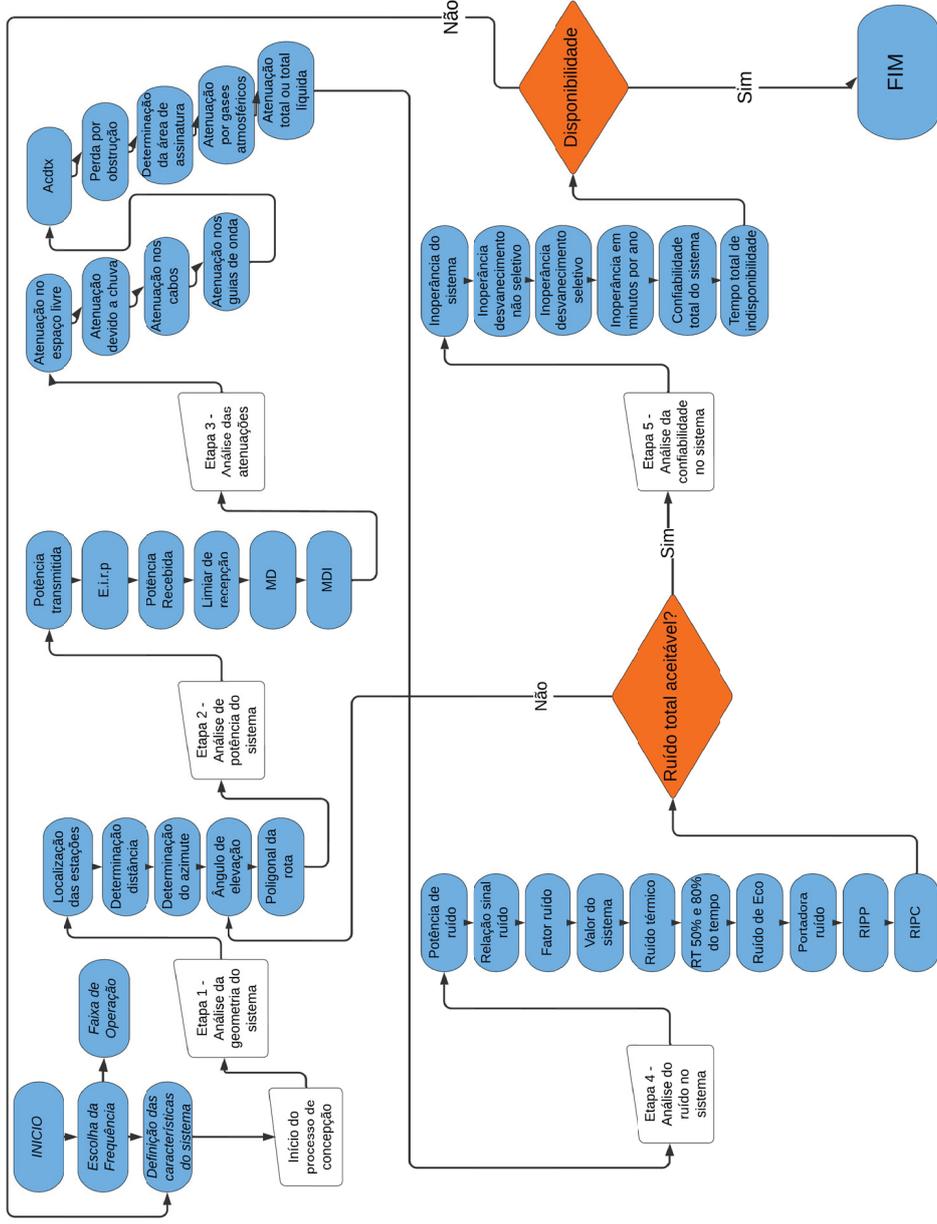
Este Capítulo 4 apresenta uma análise de caso na qual suas particularidades são descritas, bem como os resultados obtidos desse estudo. Para tal foram utilizados 3 *links* operando nas distintas frequências de 4 GHz, 5 GHz e 8 GHz. O embasamento teórico fornecido pelos capítulos anteriores constitui e dá o balizamento necessário para a concepção do sistema de transmissão pretendido.

Visando boa compreensão e entendimento deste Capítulo a divisão utilizada para apresentação dos resultados foi a seguinte:

- Descrição técnica do enlace;
- Resultados obtidos da sua geometria;
- Resultados obtidos dos efeitos de atenuação;
- Resultados obtidos da análise da potência;
- Resultados obtidos dos níveis de interferências;
- Aplicação dos modelos de propagação;
- Análise da confiabilidade.
- Análise da disponibilidade;

O objetivo primordial desse capítulo é o de apresentar uma metodologia que venha a contribuir com a pesquisa relacionada a área de concepção de sistemas de transmissão. Para tal apresenta-se um fluxograma para uma melhor compreensão daquilo que foi realizado.

FIGURA 6 - FLUXOGRAMA PARA PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.



FONTE: O Autor (2024)

A descrição do Fluxograma apresentado como proposta de metodologia para este trabalho, segue detalhado nos QUADRO 9, QUADRO 10, QUADRO 11, QUADRO 12, QUADRO 13 e QUADRO 14.

QUADRO 9 – DESCRIÇÃO DO FLUXOGRAMA.

Etapas importantes
Escolha da frequência
Determinação da faixa de operação.
Definição das características do sistema.
Início do processo de concepção

FONTE: O Autor (2024)

- Análise da geometria do enlace

QUADRO 10 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO A GEOMETRIA DO ENLACE.

Parâmetros geométricos
Localização das estações
Distância ortodrômica
Azimuthes
Ângulos de elevação
Poligonal da rota

FONTE: O Autor (2024)

- Determinação dos parâmetros de potência

QUADRO 11 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO A POTÊNCIA DO SISTEMA.

Parâmetros de potência
Potência transmitida (Pt) [dBm]
Potência efetiva isotropicamente radiada (E.i.r.p) [dBm]
Potência recebida (Pr) [dBm]
Limiar de recepção (LR) [dBm]
Margem de desvanecimento (MD) [dB]
Margem de desvanecimento por interferências (MDI) [dB]

FONTE: O Autor (2024)

- Análise das atenuações

QUADRO 12 – DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO AS ATENUAÇÕES

Parâmetros relativos às atenuações
Atenuação no espaço livre (Ael) [dB]
Atenuação devido à chuva (Aac) [dBm]
Atenuação nos cabos (Aca) [dB]
Atenuação nos guias de onda no lado transmissor (Ago) [dB]
Atenuação nos circuitos de derivação (Acctx) [dB]
Perda por obstrução (Atob) [dB]
Área de assinatura (Sw) [dB]
Atenuação por gases atmosféricos (Aga) [dB]
Atenuação total ou total líquida (At) [dB]

FONTE: O Autor (2024)

- Análise do ruído no sistema

QUADRO 13 - DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO AO RUÍDO DO SISTEMA.

Parâmetros de ruído
Potência de ruído (Pruído) [dB]
Relação sinal ruído - (RSR) [dB]
Fator ruído - (FR)
Valor de sistema – (VS) [dB]
Ruído térmico – (RT) [dBm] ou [dBW]
Ruído térmico para 50% e 80% do tempo – (RT) [dBm]
Ruído de eco (RE) [dB]
Relação portadora ruído – (C/N) [dB]
Ruído interferente de polarização paralela – (RI _{PP}) [dB]
Ruído interferente de polarização cruzada – (RI _{PC}) [dB]
Ruído total (R _{total}) [dBm]

FONTE: O Autor (2024)

- Análise da confiabilidade no sistema

QUADRO 14 - DETALHAMENTO DO FLUXOGRAMA EM RELAÇÃO A CONFIABILIDADE SISTEMA.

Parâmetros de confiabilidade
Inoperância do sistema (IS) [%]
Inoperância por desvanecimento não seletivo (PI) [%]
Inoperância por desvanecimento seletivo (PS) [%]
Inoperância em minutos por ano (PI _μ) [%]
Confiabilidade total do sistema (C) [%]
Tempo total de indisponibilidade (TTI) [%]
Disponibilidade do sistema

FONTE: O Autor (2024)

4.1 APRESENTAÇÃO DO ENLACE

O enlace desenvolvido possui as seguintes características básicas:

- Contempla toda a orla marítima do município de Pontal do Paraná;
- As distâncias percorridas pelo sinal devem contemplar toda a orla do município;
- O enlace deverá operar em três frequências 4 GHz, 5 GHz e 8 GHz na configuração ponto – multiponto;

As características geométricas utilizadas para o sistema radiante dentro da campanha de medidas para 4 e 5 GHz são sumarizadas no QUADRO 15 e o QUADRO 16 sumariza o mesmo para a frequência de 8 GHz.

QUADRO 15 – INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA PARA AS FREQUÊNCIAS DE 4 E 5 GHz

Quantidade	Descrição
03	Torre Autoportante 30 a 35 m Pintura Epoxi Pu
04	1.8m 6ft ValuLine® High Performance, High XPD Antenna, dual-polarized, 4,4 – 5 GHz, Gain 36,8 dBi
250	Cabo Coaxial RG213 (CI Cordinha Cobre - Trança Cobre 96% - Capa PVC Preto)
2	Rádio Digital ALFOpls2 Siae para frequências de 4 a 42 GHz
40	Periféricos

FONTE: O AUTOR (2024)

QUADRO 16 – INFRAESTRUTURA NECESSÁRIA PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz

Quantidade	Descrição
03	Torre Autoportante 30 a 35 m Pintura Epoxi Pu
04	0.6 m 2 ft ValuLine® High Performance Low Profile Antenna, single polarized, 7.100–8.500 GHz, PBR84 flange, Gain 32,2 dBi
250	Cabo Coaxial RG213 (CI Cordinha Cobre - Trança Cobre 96% - Capa PVC Preto)
2	Rádio Digital ALFO pls2 Siae para frequências de 4 a 42 GHz
40	Periféricos

FONTE: O AUTOR (2024)

Para a campanha de medidas voltadas para as três frequências escolhidas, foi utilizado como transmissor o gerador de sinais ALS-E028 da *Siae Microelettronica* em configuração simples para as duas primeiras frequências e configuração duplicada

para a última frequência. O QUADRO 17 a seguir mostra as configurações técnicas do gerador utilizadas na campanha de medição.

QUADRO 17 - SET-UP DO GERADOR DE SINAIS ALS-E028.

Faixa de frequência		4 GHz	7/8 GHz
Faixa de operação		4.4-5.2	7.11-8.5
Espaçamento do canal	4 QAM	4 Mbits (3.5 MHz BW) até 100 Mbits (56 MHz)	
	8 QAM	18 Mbits (7MHz BW) até 150 Mbits (56 MHz)	
	64 QAM	38 Mbits (7MHz BW) até 290 Mbits (56 MHz BW)	
Configurações possíveis		1+0 / 1+1 MHSB / 1+1 SD / 1+1 FD / 2+0 / 2x(1+1)	
		Acima de 8x(1+1) ou acima de 16x(1+0)	
Modulações possíveis		4 QAM / 8 QAM / 64 QAM	
Configurações de capacidades		2xE1 / 4xE1 / 5xE1 / 8xE1 / 10xE1 / 16xE1 / 21xE1 / 32xE1 / 42xE1 / 53xE1 / 1xSTM1 / 80xE1 / 160xE1 / 2xSTM1 / 4xSTM1	
<i>Ethernet Throughput</i>		Acima de 1 Gbps por canal de rádio	
Potência de saída [dBm]	4 QAM	+29/-	+27/+29
	8 QAM	-	-/+29
	64 QAM	-	-/+25
Sensibilidade do receptor [dBm] para um BER 10 ⁻⁶ (1+0 conf., 28 MHz BW, incluindo as perdas no filtro de RF)	4 QAM	-85/-	-83/-89,5
	8 QAM	-	-/-82,5
	64 QAM	-	-/-75,5
Estabilidade da frequência		± 5 ppm	
Flexibilidade da frequência		250 kHz (programável por <i>software</i>), 125 kHz	
Controle de Potência de Transmissão de Rádio. RTPC		Até 20/30 em incrementos de 1 dB.	
Controle Automático de Potência de Transmissão - ATPC		Até 20/40 em incrementos de 1 dB.	
Interfaces de gerenciamento		RS232C, USB, Ethernet 10 BASE-T (TMN)	
Interconexão entre a Unidade de Distribuição Interna (IDU) e a Unidade de Distribuição Externa (ODU) - IDU/ODU (por terminal).		Cabo coaxial RT para 50 ohm.	
Alimentação		-48 Vdc (- 15%, + 20%)	
Consumo Total de Energia (por Terminal)			
1+0 configuration		≤ 34 W	≤ 42 W ≤ 60 W
1+1 configuration		≤ 59 W	≤ 72 W ≤ 90 W
Desempenho Ambiental – classe de Proteção contra Intempéries para ODU. Faixa de Temperatura para IDU (Unidade de Distribuição Interna) Faixa de Temperatura para ODU (Unidade de Distribuição Externa).		IP65 - 5 °C to + 50 °C - 35 °C to + 55 °C	
Em conformidade com		ETSI EN 302 217	

FONTE: O AUTOR (2024)

Para 8 GHz previu-se canais adicionais, intercalados entre os canais principais, com uma frequência central de 14,5 MHz abaixo da frequência central dos

canais principais. Isso devido ao fato de se ter optado por uma configuração duplicada. Para o caso de rádio enlaces com 2 x 34 Mbit/s, 2 x 45 Mbit/s, 140 Mbit/s e ainda para as hierarquias digitais síncronas foram realizadas verificações antes da consideração de canais adicionais.

De posse da descrição do cenário, respeitando-se as limitações interpostas no QUADRO 17, da canalização possível para as frequências e dos ajustes realizados procedeu-se aos passos previstos no FLUXOGRAMA (FIGURA 6).

4.2 RESULTADOS RELATIVOS À GEOMÉTRICA DO ENLACE

Como o objetivo neste ponto é o projeto de um sistema ponto multiponto onde serão analisados três *links* em distâncias distintas cobrindo a orla do município de Pontal do Paraná com extensão total de 17,3 km. Foram utilizados para este cálculo as EQUAÇÕES (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) apresentadas no item 2.3 cujos resultados obtidos encontram-se sumarizados no QUADRO 18.

QUADRO 18 – RESULTADOS REFERENTES A GEOMETRIA DOS SITES.

		<i>Link 1</i> (PL_CAR)	<i>Link 2</i> (CAR_PS)	<i>Link 3</i> (PS_PL)
Ponto A	Lat	-25,6982	-25,6332	-25,5808
Graus	Long	-48,4792	-48,4312	-48,3617
Ponto B	Lat	-25,6332	-25,5808	-25,6982
Graus	Long	-48,4312	-48,3617	-48,4792
Distância Ortodrômica	Δ (graus)	0,0780	0,0818	0,1581
	d (km)	8,6801	9,0983	17,5942
Altitudes (m)	Ponto A	3,00	3,00	3,00
	Ponto B	3,00	3,00	3,00
Azimute em A e B (graus)	B→A	326,3529	309,8625	317,9017
	A→B	33,6471	50,1375	42,0983
Ângulo de Elevação (°)	Δ	0,0780	0,0818	0,1581
	AE	0,0361	0,0378	0,0731

FONTE: O AUTOR (2024)

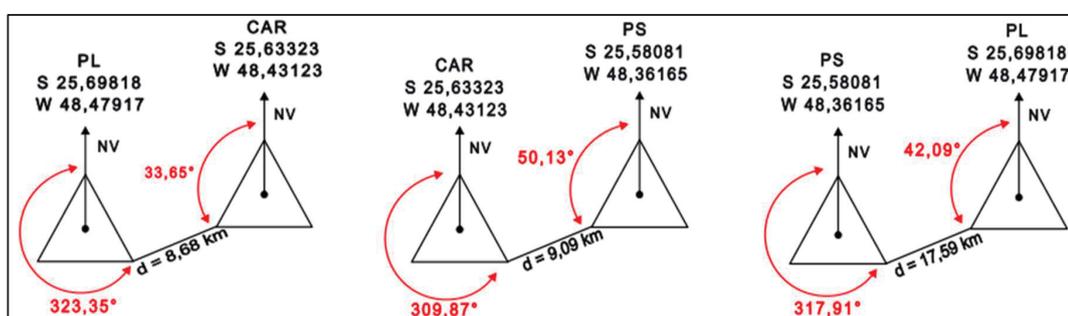
Onde PL, CAR e PS representam respectivamente as estações Praia de Leste, Carmeri e Pontal do Sul;

4.2.1 Análise Gráfica

- Determinação do poligonal de rota

A FIGURA 7 mostra o poligonal definido para os *links* PL-CAR, CAR-PS e PS-PL deste sistema seguindo as normas (3GPP TS 37.141, E-UTRA, UTRA and GSM/EDGE; *Multi-Standard Radio (MSR) Base Station*).

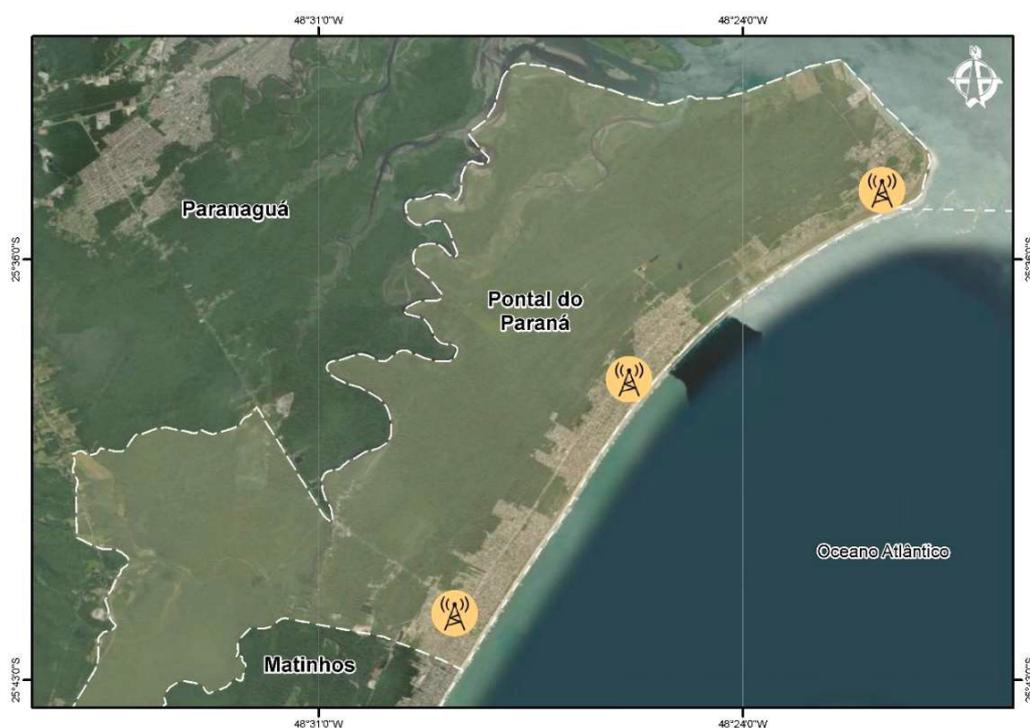
FIGURA 7 - POLIGONAL DA ROTA PARA OS TRECHOS PL-CAR - CAR-PS - PS-PL.



FONTE: O autor (2024).

Uma vez determinado os resultados mais relevantes em relação à geometria do enlace, pode-se observar também o resultado visual utilizando a ferramenta Google Earth das estações de transmissão e recepção tal como mostrado na FIGURA 8.

FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZANDO A FERRAMENTA GOOGLE EARTH.



FONTE: O AUTOR (2024)

4.2.2 Análise dos modelos de propagação

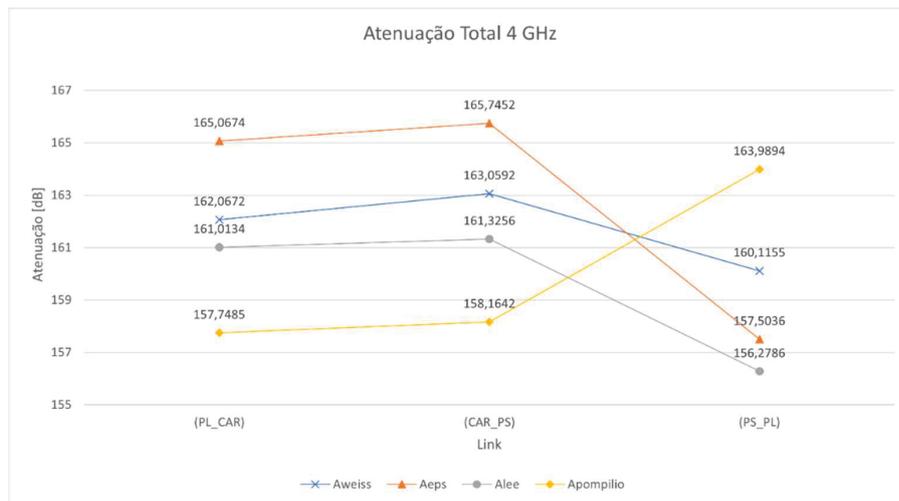
Os resultados obtidos relativos à atenuação sofrida pelo sinal para cada modelo de propagação utilizado nessa dissertação foram calculados para cada uma das frequências de operação e são mostrados a seguir.

QUADRO 19 - RESULTADO DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.

		<i>Link 1</i> (PL_CAR)	<i>Link 2</i> (CAR_PS)	<i>Link 3</i> (PS_PL)
Atenuação Total do modelo de Weissberger [dB]	$A_{Weiss} (f1)$	162,0672	163,0592	160,1155
Atenuação total do modelo Epstein-Peterson [dB]	$A_{Eps} (f2)$	165,0674	165,7452	157,5036
Atenuação Total do modelo de Lee [dB]	$A_{Lee} (f3)$	161,0134	161,3256	156,2786
Atenuação Total do modelo Pompilio [dB]	$A_{Pompilio} (f4)$	157,7485	158,1642	163,9894

FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 1 – RESULTADOS DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.



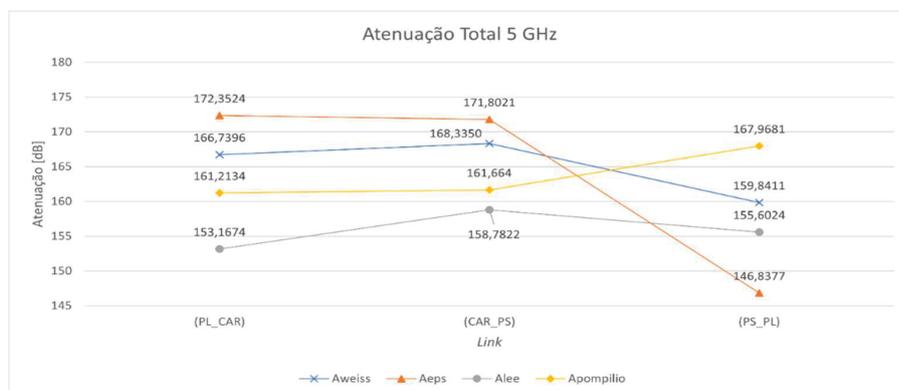
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 20 - RESULTADO DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.

		<i>Link 1 (PL_CAR)</i>	<i>Link 2 (CAR_PS)</i>	<i>Link 3 (PS_PL)</i>
Atenuação total do modelo de Weissberger [dB]	$A_{Weiss} (f1)$	166,7396	168,3350	159,8411
Atenuação total do modelo Epstein-Peterson [dB]	$A_{Eps} (f2)$	172,3524	171,8021	146,8377
Atenuação total do modelo de Lee [dB]	$A_{Lee} (f3)$	153,1674	158,7822	155,6024
Atenuação Total do modelo Pompilio [dB]	$A_{Pompilio} (f4)$	161,2134	161,664	167,9681

FONTE: O AUTOR (2024)

GRÁFICO 2 – RESULTADOS DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.



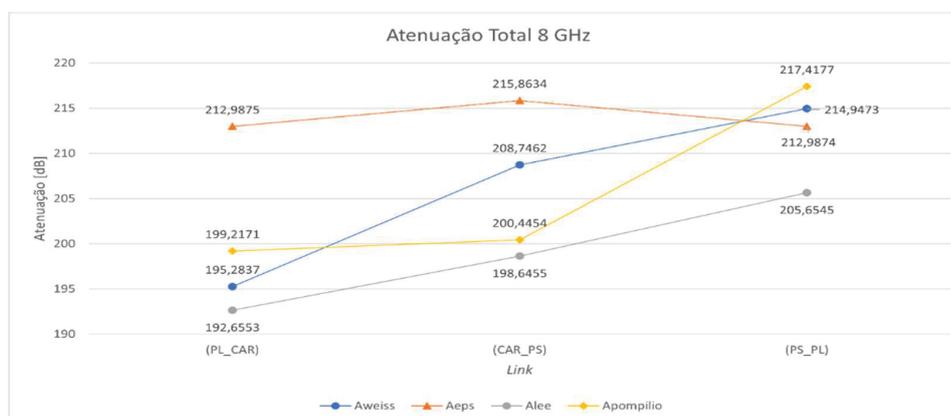
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 21 - RESULTADO DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.

		<i>Link 1</i> (PL_CAR)	<i>Link 2</i> (CAR_PS)	<i>Link 3</i> (PS_PL)
Atenuação Total do modelo de Weissberger [dB]	A_{Weiss} (f1)	195,2837	208,7462	214,9473
Atenuação Total do modelo Epstein-Peterson [dB]	A_{Eps} (f2)	212,9875	215,8634	212,9874
Atenuação Total do modelo de Lee [dB]	A_{Lee} (f3)	192,6553	198,6455	205,6545
Atenuação Total do modelo Pompilio [dB]	$A_{Pompilio}$ (f4)	199,2171	200,4454	217,4177

FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 3 – RESULTADOS DAS ATENUAÇÕES DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.



FONTE: O autor (2024)

Os critérios de comparação entre os modelos apresentados nesta seção foram definidos pela diferença entre: *atenuação calculada x distância entre os links*.

Analisando-se o desempenho dos modelos para a frequência de 4, 5 e 8 GHz desprende-se que a atenuação utilizando o modelo de Pompilio, que leva em consideração não só a morfologia da área de estudo, mas também os efeitos de chuva sobre os *links*, apresentou melhores resultados que os demais modelos. O segundo melhor resultado foi apresentado pelo modelo de Weissberger seguido de Lee. Do modelo de Epstein-Peterson atribui-se seu desempenho abaixo dos modelos precedentes devido ao fato de que este considera a reflexão do sinal no solo no cálculo da sua atenuação o que ocasiona retardos de sinal e conseqüente piora no desempenho do modelo.

4.3 RESULTADOS REFERENTES AS ATENUAÇÕES

O objetivo neste ponto é de sintetizar as possíveis atenuações que podem ocorrer entre os *links*. Aspectos como perdas devido à absorção dos gases atmosféricos, bem como atenuações causadas pela chuva, perdas na transmissão e área de assinatura, foram meticulosamente investigados e calculados. Isso permitiu a determinação da atenuação máxima para cada *link* e também para todo o sistema. Os resultados obtidos estão sumarizados nos quadros apresentados a seguir:

O QUADRO 22 apresenta os resultados específicos relativos à atenuação devido à chuva para 4 GHz.

QUADRO 22 - RESULTADOS RELATIVOS À ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA 4 GHz.

Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,6929	6,116055	5,236934	4,273561	4,111022	2,727169
Polarização Vertical	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591
Polarização Horizontal	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650
índice α - Vertical	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
índice α - Horizontal	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121
Yr - atenuação unitária vertical	0,008545	0,027006	0,052537	0,079002	0,083481	0,124468
Yr - atenuação unitária horizontal	0,010536	0,03498	0,070015	0,107138	0,113478	0,17211
Aac vert Atenuação chuva com polarização vertical	0,05719	0,16517	0,275135	0,337622	0,343192	0,339446
Aac horiz Atenuação chuva com polarização horizontal	0,070516	0,213937	0,366662	0,457859	0,466512	0,469374
Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,9388	6,320746	5,38629	4,372503	4,2025	2,767127
Polarização Vertical	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591
Polarização Horizontal	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650
índice α - Vertical	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
índice α - Horizontal	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121
Yr vertical	0,008545	0,027006	0,052537	0,079002	0,083481	0,124468
Yr horizontal	0,010536	0,03498	0,070015	0,107138	0,113478	0,17211
Aac vert Atenuação chuva com polarização vertical	0,059291	0,170698	0,282982	0,345438	0,350829	0,344419
Aac horiz Atenuação chuva com polarização horizontal	0,073107	0,221097	0,37712	0,468459	0,476893	0,476251
Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	10,98384	9,511593	7,54249	5,693864	5,408935	3,243475
Polarização Vertical	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591
Polarização Horizontal	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650
índice α - Vertical	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
índice α - Horizontal	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121
Yr vertical	0,008545	0,027006	0,052537	0,079002	0,083481	0,124468
Yr horizontal	0,010536	0,03498	0,070015	0,107138	0,113478	0,17211
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,093856	0,25687	0,396264	0,449829	0,451543	0,403709
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,115726	0,332711	0,528085	0,610026	0,613798	0,558235

FONTE: O autor (2024)

O QUADRO 23 apresenta os resultados relativos à atenuação devido à chuva para 5 GHz.

QUADRO 23 - RESULTADOS RELATIVOS À ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA 5 GHz.

Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,6929	6,116055	5,236934	4,273561	4,111022	2,727169
Polarização Vertical	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
Polarização Horizontal	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175
índice α - Vertical	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265
índice α - Horizontal	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Yr vertical	0,035933	0,13918	0,304556	0,492212	0,525208	0,840354
Yr horizontal	0,045145	0,183096	0,411461	0,675928	0,722833	1,175188
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,240497	0,851234	1,594939	2,103498	2,159144	2,291787
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,302149	1,119826	2,154794	2,88862	2,971583	3,204937
Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,9388	6,320746	5,38629	4,372503	4,2025	2,767127
Polarização Vertical	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
Polarização Horizontal	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175
índice α - Vertical	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265
índice α - Horizontal	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Yr vertical	0,035933	0,13918	0,304556	0,492212	0,525208	0,840354
Yr horizontal	0,045145	0,183096	0,411461	0,675928	0,722833	1,175188
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,249333	0,879723	1,640427	2,152198	2,207188	2,325366
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,31325	1,157304	2,216249	2,955498	3,037706	3,251895
Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	10,98384	9,511593	7,54249	5,693864	5,408935	3,243475
Polarização Vertical	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
Polarização Horizontal	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175
índice α - Vertical	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265
índice α - Horizontal	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Yr vertical	0,035933	0,13918	0,304556	0,492212	0,525208	0,840354
Yr horizontal	0,045145	0,183096	0,411461	0,675928	0,722833	1,175188
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,394685	1,323826	2,29711	2,802588	2,840818	2,725667
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,495863	1,741535	3,103441	3,848643	3,909757	3,811693

FONTE: O autor (2024)

O QUADRO 24 apresenta os resultados específicos relativos à atenuação devido à chuva para 8 GHz.

QUADRO 24 - RESULTADOS RELATIVOS À ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA PARA 8 GHz.

Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,6929	6,116055	5,236934	4,273561	4,111022	2,727169
Polarização Vertical	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395
Polarização Horizontal	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454
índice α - Vertical	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310
índice α - Horizontal	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
Yr vertical	1,398682	5,684871	12,7911	21,02855	22,4901	36,59178
Yr horizontal	0,12278	0,508199	1,155558	1,912032	2,046708	3,351129
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	9,361237	34,76898	66,98615	89,86681	92,45731	99,79198
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,821758	3,108175	6,051582	8,171185	8,414061	9,139097
Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,9388	6,320746	5,38629	4,372503	4,2025	2,767127
Polarização Vertical	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395
Polarização Horizontal	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454
índice α - Vertical	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310
índice α - Horizontal	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
Yr vertical	1,398682	5,684871	12,7911	21,02855	22,4901	36,59178
Yr horizontal	0,12278	0,508199	1,155558	1,912032	2,046708	3,351129
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	9,705172	35,93262	68,89659	91,94741	94,51466	101,2541
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,851949	3,212199	6,224173	8,360364	8,60129	9,273
Atenuação devido à chuva (Aac) [dB] - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	10,98384	9,511593	7,54249	5,693864	5,408935	3,243475
Polarização Vertical	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395
Polarização Horizontal	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454
índice α - Vertical	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310
índice α - Horizontal	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
Yr vertical	1,398682	5,684871	12,7911	21,02855	22,4901	36,59178
Yr horizontal	0,12278	0,508199	1,155558	1,912032	2,046708	3,351129
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	15,3629	54,07217	96,47675	119,7337	121,6475	118,6845
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	1,348601	4,833786	8,715787	10,88685	11,07051	10,8693

FONTE: O autor (2024)

Na sequência foram analisados os aspectos relativos as atenuações totais sofridas por cada *link* para cada uma das frequências de trabalho do enlace.

QUADRO 25 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DA ATENUAÇÃO TOTAL PARA 4 GHz.

Atenuação total (At) - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	0,05719	0,16517	0,275135	0,337622	0,343192	0,339446
Aac horiz	0,070516	0,213937	0,366662	0,457859	0,466512	0,469374
Atenuação no espaço livre	123,2517					
Atenuação Pompílio	157,7485					
Atenuação Weissberger	162,0672					
Atenuação Epstein-Peterson	165,0674					
Atenuação Lee	161,0134					
Aca	21,5					
Acctx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	1,95E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,0383					
At vert	157,5089	157,6169	157,7268	157,7893	157,7949	157,7911
At horiz	157,5222	157,6656	157,8184	157,9096	157,9182	157,9211
Atenuação total (At) - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	0,059291	0,170698	0,282982	0,345438	0,350829	0,344419
Aac horiz	0,073107	0,221097	0,37712	0,468459	0,476893	0,476251
Atenuação no espaço livre	123,6604					
Atenuação Pompílio	158,1642					
Atenuação Weissberger	163,0592					
Atenuação Epstein-Peterson	165,7452					
Atenuação Lee	161,3256					
Aca	21,5					
Acctx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	1,95E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,1225					
At vert	157,9197	158,0311	158,1433	158,2058	158,2112	158,2048
At horiz	157,9335	158,0815	158,2375	158,3288	158,3373	158,3366
Atenuação total (At) - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	0,093856	0,25687	0,396264	0,449829	0,451543	0,403709
Aac horiz	0,115726	0,332711	0,528085	0,610026	0,613798	0,558235
Atenuação no espaço livre	129,3886					
Atenuação Pompílio	163,9894					
Atenuação Weissberger	160,1155					
Atenuação Epstein-Peterson	157,5036					
Atenuação Lee	156,2786					
Aca	29					
Acctx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	1,95E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,2447					
At vert	163,6825	163,8455	163,9849	164,0384	164,0402	163,9923
At horiz	163,7043	163,9213	164,1167	164,1986	164,2024	164,1468

FONTE: O autor (2024)

QUADRO 26 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DA ATENUAÇÃO TOTAL PARA 5 GHz.

Atenuação total (At) - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	0,240497	0,851234	1,594939	2,103498	2,159144	2,291787
Aac horiz	0,302149	1,119826	2,154794	2,88862	2,971583	3,204937
Atenuação no espaço livre	125,1899					
Atenuação Pompílio	161,2134					
Atenuação Weissberger	166,7396					
Atenuação Epstein-Peterson	172,3524					
Atenuação Lee	153,1674					
Aca	21,5					
Acctx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	8,71E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,0575					
At vert	159,6304	160,2411	160,9848	161,4934	161,5490	161,6817
At horiz	159,6920	160,5097	161,5447	162,2785	162,3615	162,5948
Atenuação total (At) - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	0,249333	0,879723	1,640427	2,152198	2,207188	2,325366
Aac horiz	0,31325	1,157304	2,216249	2,955498	3,037706	3,251895
Atenuação no espaço livre	125,5986					
Atenuação Pompílio	161,6640					
Atenuação Weissberger	168,3350					
Atenuação Epstein-Peterson	171,8021					
Atenuação Lee	158,7822					
Aca	21,5					
Acctx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	8,71E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,1838					
At vert	160,0479	160,6783	161,4390	161,9508	162,0058	162,1239
At horiz	160,1118	160,9559	162,0148	162,7541	162,8363	163,0505
Atenuação total (At) - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	0,394685	1,323826	2,29711	2,802588	2,840818	2,725667
Aac horiz	0,495863	1,741535	3,103441	3,848643	3,909757	3,811693
Atenuação no espaço livre	131,3268					
Atenuação Pompílio	167,9681					
Atenuação Weissberger	159,8411					
Atenuação Epstein-Peterson	146,8377					
Atenuação Lee	155,9681					
Aca	21,5					
Acctx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	8,71E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,3671					
At vert	165,9215	166,8506	167,8239	168,3294	168,3676	168,2525
At horiz	166,0227	167,2683	168,6302	169,3755	169,4366	169,3385

FONTE: O autor (2024)

QUADRO 27 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DA ATENUAÇÃO TOTAL PARA 8 GHz.

Atenuação total (At) - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	9,361237	34,76898	66,98615	89,86681	92,45731	99,79198
Aac horiz	0,821758	3,108175	6,051582	8,171185	8,414061	9,139097
Atenuação no espaço livre	129,2723					
Atenuação Pompílio	199,2171					
Atenuação Weissberger	195,2837					
Atenuação Epstein-Peterson	212,9875					
Atenuação Lee	192,6553					
Aca	21,5					
Acdtx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	5,75E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,0830					
At vert	172,8335	198,2413	230,4584	253,3391	255,9296	263,2643
At horiz	164,2941	166,5805	169,5239	171,6435	171,8864	172,6114
Atenuação total (At) - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	9,705172	35,93262	68,89659	91,94741	94,51466	101,2541
Aac horiz	0,851949	3,212199	6,224173	8,360364	8,60129	9,273
Atenuação no espaço livre	129,681					
Atenuação Pompílio	200,4454					
Atenuação Weissberger	208,7462					
Atenuação Epstein-Peterson	215,8634					
Atenuação Lee	198,6455					
Aca	21,5					
Acdtx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	5,75E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,2655					
At vert	173,5861	199,8136	232,7776	255,8284	258,3956	265,1351
At horiz	164,7329	167,0932	170,1051	172,2413	172,4823	173,1540
Atenuação total (At) - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
Aac vert	15,3629	54,07217	96,47675	119,7337	121,6475	118,6845
Aac horiz	1,348601	4,833786	8,715787	10,88685	11,07051	10,8693
Atenuação no espaço livre	135,4092					
Atenuação Pompílio	217,4177					
Atenuação Weissberger	214,9473					
Atenuação Epstein-Peterson	212,9874					
Atenuação Lee	205,6545					
Aca	21,5					
Acdtx	4					
Área de assinatura S_w [dB]	5,75E-10					
Atenuação por gases atmosféricos [dB]	0,5303					
At vert	184,9721	223,6814	266,0860	289,3429	291,2567	288,2937
At horiz	170,9578	174,4430	178,3250	180,4961	180,6797	180,4785

FONTE: O autor (2024)

A partir dos dados obtidos, foi possível estimar a perda por transmissão para cada enlace do sistema. Destaca-se que a atenuação devido à chuva emerge como um fator crítico e uma das principais métricas deste estudo. No cálculo da atenuação por chuva, foram consideradas as polarizações vertical e horizontal das antenas, bem como todos os índices pluviométricos preconizados pelo ITU-R837-1. Como previsto, observou-se uma correlação direta entre o aumento do índice pluviométrico e a elevação da atenuação. Para a avaliação da disponibilidade do enlace, os parâmetros relativos às atenuações causadas pela chuva serão novamente submetidos a análise.

Conforme explicado anteriormente, o conceito de "área de assinatura" em um rádio enlace refere-se à região geográfica ou setor onde as antenas de transmissão e recepção mantêm visibilidade direta uma para a outra. Embora não seja diretamente regulamentada, na prática, é reconhecido que sistemas mais robustos são associados a valores menores dessa métrica. Recomenda-se, portanto, que a área de assinatura permaneça em torno de 10^{-10} como limite. Os resultados obtidos demonstraram que todos os enlaces estão em conformidade com esse limite estabelecido.

4.4 RESULTADOS RELATIVOS À POTÊNCIA

A determinação da potência transmitida, representando a potência na saída da antena, é um fator crítico tanto para garantir o desempenho do sistema quanto para cumprir normas regulatórias relacionadas ao controle de interferências entre sistemas operando na mesma faixa e área de cobertura. Nesta seção, serão apresentados os resultados relativos à potência do sinal transmitido e recebido, os níveis de E.i.r.p, bem como uma análise da margem de desvanecimento, tanto comum quanto aquela causada por interferência.

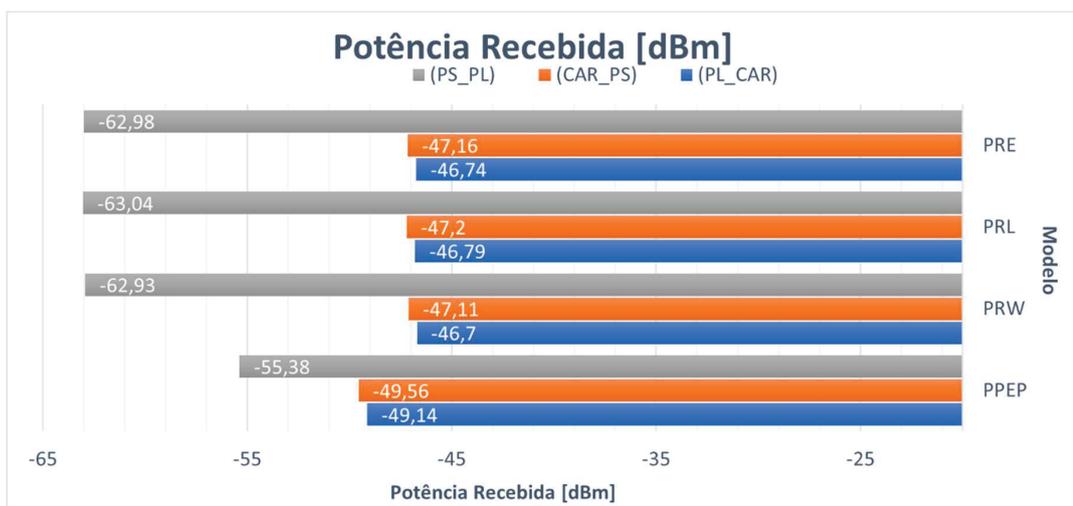
No ambiente considerado para esta análise utilizou-se critérios normais de desobstrução, nos *links* avaliados. Os quadros a seguir exibem os resultados obtidos para cada frequência de operação do enlace, fornecendo uma visão do desempenho do sistema em diferentes condições de propagação.

QUADRO 28 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA PARA FREQUÊNCIA DE 4 GHz

		(PL_CAR)	(CAR_PS)	(PS_PL)
Potência Transmitida em [dBm]	P_T	35	35	35
E.I.R.P em [dBm]	E.i.r.p	41,6	41,6	41,6
Limiar de Recepção, [dBm]	LR	-72	-72	-72
Potência Recebida em [dBm], (modelo Pompilio)	P_{PEP}	-49,14	-49,56	-55,38
Potência Recebida em [dBm], (modelo Weissberger)	P_{RW}	-46,7	-47,11	-62,93
Potência Recebida em [dBm], (modelo Lee)	P_{RL}	-46,79	-47,2	-63,04
Potência Recebida em [dBm] (modelo Epstein Peterson)	P_{RE}	-46,74	-47,16	-62,98
MD em [dB], (modelo Pompilio)	MD_P	22,85	22,43	16,61
MD em [dB], (modelo Weissberger)	MD_W	25,29	24,88	9,06
MD em [dB], (modelo Lee)	MD_L	25,2	24,79	8,95
MD em [dB], (modelo Epstein Peterson)	MD_E	25,25	24,83	9,09
MDI em [dB], (modelo Pompilio)	MDI_P	21,85	21,43	15,61
MDI em [dB], (modelo Weissbereger)	MDI_W	24,29	23,88	9,06
MDI em [dB], (modelo Lee)	MDI_L	24,2	23,79	7,95
MDI em [dB], (modelo Epstein Peterson)	MDI_E	24,25	23,83	8,09

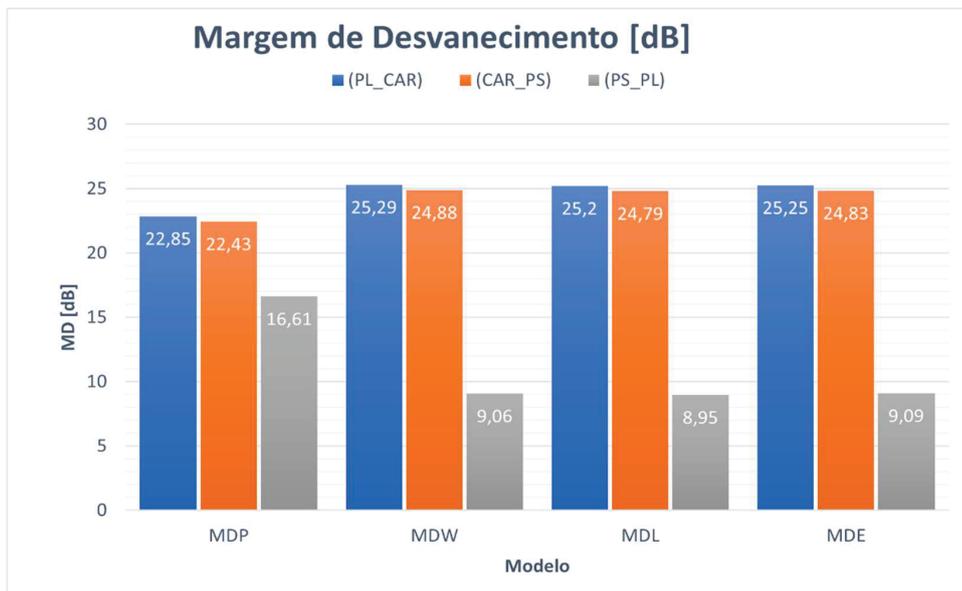
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 4 – RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.



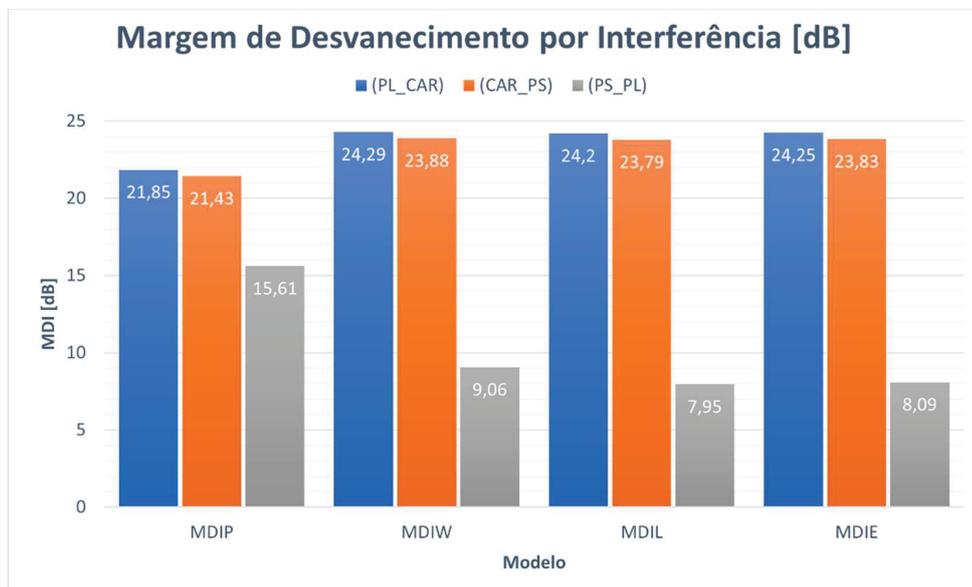
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 5 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.



FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 6 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO POR INTERFERÊNCIA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHz.



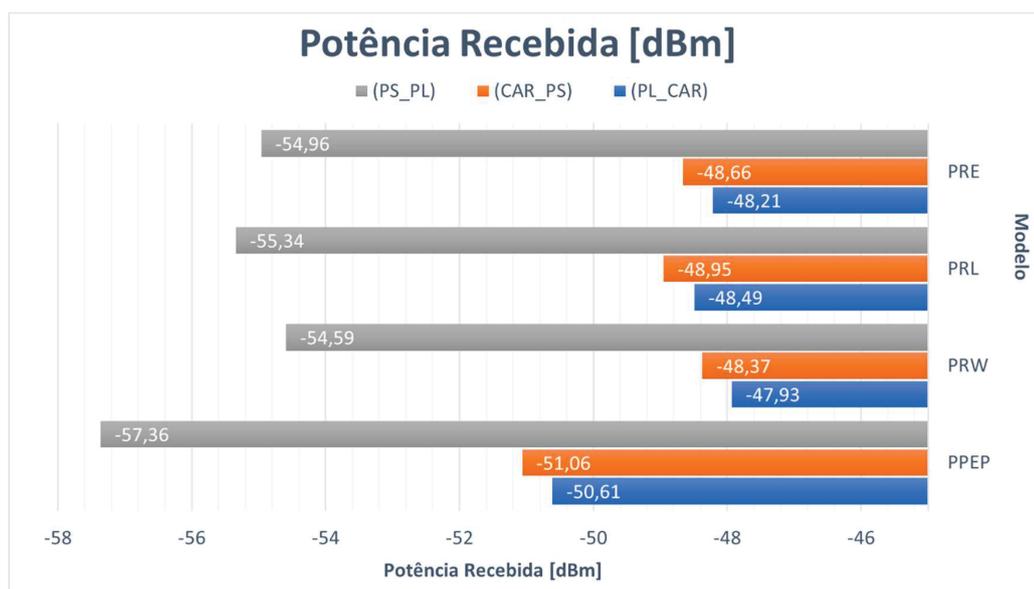
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 29 - RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA PARA FREQUÊNCIA DE 5 GHz

		(PL_CAR)	(CAR_PS)	(PS_PL)
Potência Transmitida em [dBm]	P_T	37	37	37
E.I.R.P em [dBm]	E.i r.p	43,6	43,6	43,6
Limiar de Recepção, [dBm]	LR	-78	-78	-78
Potência Recebida em [dBm], (modelo Pompilio)	P_{PEP}	-50,61	-51,06	-57,36
Potência Recebida em [dBm], (modelo Weissberger)	P_{RW}	-47,93	-48,37	-54,59
Potência Recebida em [dBm], (modelo Lee)	P_{RL}	-48,49	-48,95	-55,34
Potência Recebida em [dBm] (modelo Epstein Peterson)	P_{RE}	-48,21	-48,66	-54,96
MD em [dB], (modelo Pompilio)	MD_P	27,38	26,93	20,63
MD em [dB], (modelo Weissberger)	MD_W	30,06	29,62	23,4
MD em [dB], (modelo Lee)	MD_L	29,5	29,04	22,65
MD em [dB], (modelo Epstein Peterson)	MD_E	29,78	29,33	23,03
MDI em [dB], (modelo Pompilio)	MDI_P	26,38	25,93	19,63
MDI em [dB], (modelo Weissbereger)	MDI_W	29,06	28,62	22,4
MDI em [dB], (modelo Lee)	MDI_L	28,5	28,04	21,65
MDI em [dB], (modelo Epstein Peterson)	MDI_E	28,78	28,33	22,03

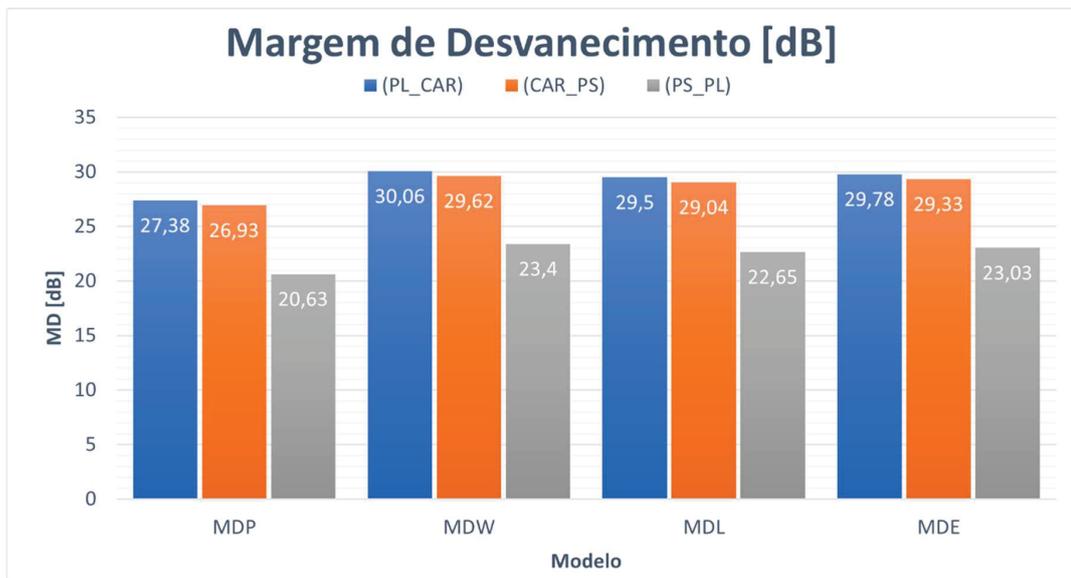
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 7 – RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.



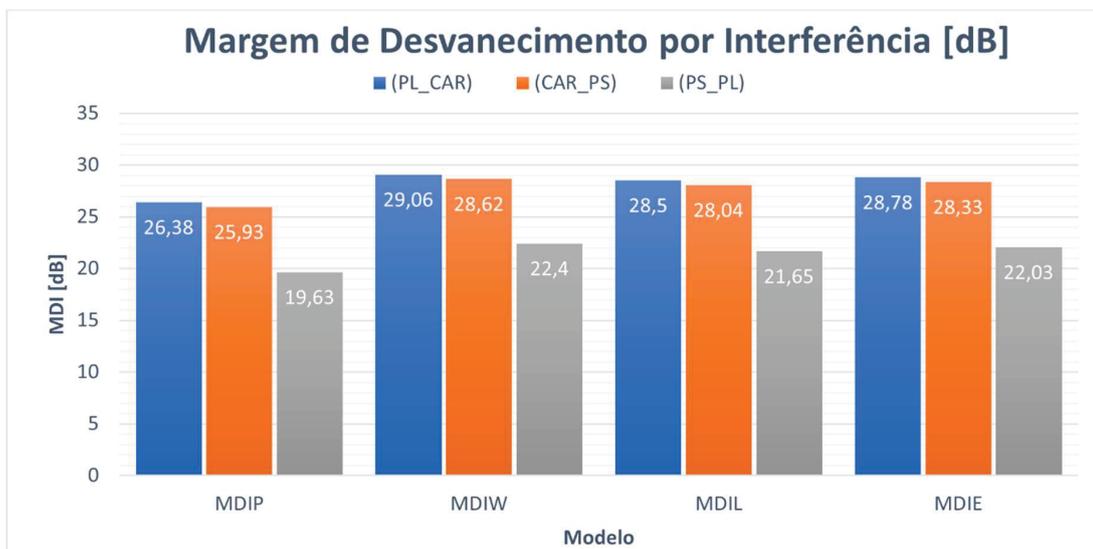
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 8 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.



FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 9 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO POR INTERFERÊNCIA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 5 GHz.



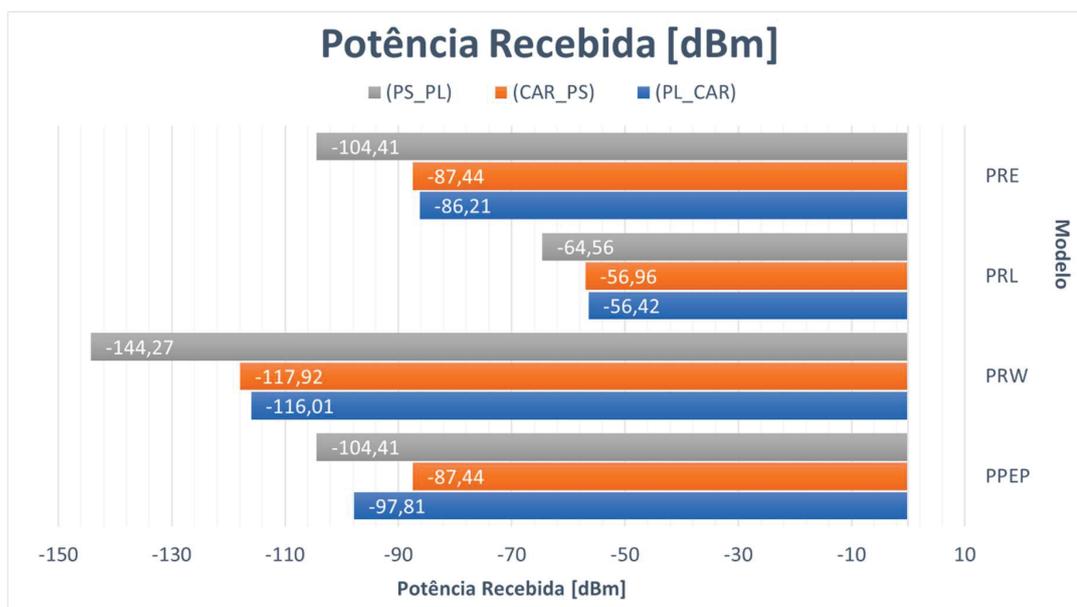
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 30- RESULTADOS REFERENTES AOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA PARA FREQUÊNCIA DE 8 GHz

		(PL_CAR)	(CAR_PS)	(PS_PL)
Potência Transmitida em [dBm]	P_T	37	37	37
E.I.R.P em [dBm]	E.i.r.p	39	39	39
Limiar de Recepção, [dBm]	LR	-78	-78	-78
Potência Recebida em [dBm], (modelo Pompilio)	P_{PEP}	-97,81	-87,44	-104,41
Potência Recebida em [dBm], (modelo Weissberger)	P_{RW}	-116,01	-117,92	-144,27
Potência Recebida em [dBm], (modelo Lee)	P_{RL}	-56,42	-56,96	-64,56
Potência Recebida em [dBm] (modelo Epstein Peterson)	P_{RE}	-86,21	-87,44	-104,41
MD em [dB], (modelo Pompilio)	MD_P	-19,81	-9,44	-26,41
MD em [dB], (modelo Weissberger)	MD_W	-38,01	-39,92	-66,27
MD em [dB], (modelo Lee)	MD_L	21,57	21,03	13,43
MD em [dB], (modelo Epstein Peterson)	MD_E	-8,21	-9,44	-26,41
MDI em [dB], (modelo Pompilio)	MDI_P	-20,81	-10,44	-27,41
MDI em [dB], (modelo Weissbereger)	MDI_W	-39,01	-40,92	-67,27
MDI em [dB], (modelo Lee)	MDI_L	20,57	20,03	12,43
MDI em [dB], (modelo Epstein Peterson)	MDI_E	-9,21	-10,44	-27,41

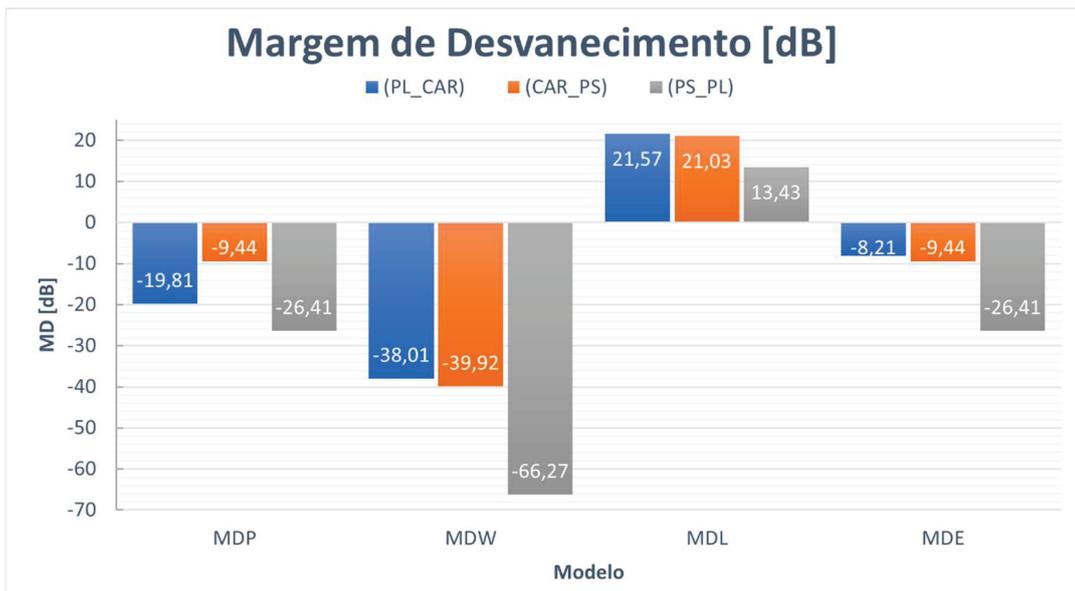
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 10 – RESULTADOS DA POTÊNCIA RECEBIDA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.



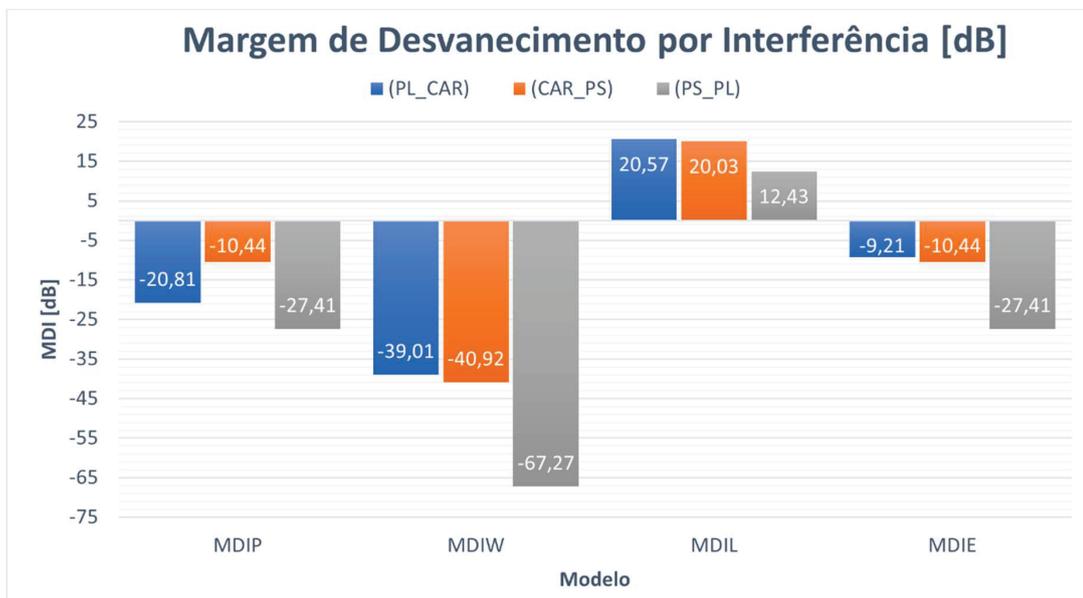
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 11 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.



FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 12 – RESULTADOS DA MARGEM DE DESVANECIMENTO POR INTERFERÊNCIA DE CADA MODELO PARA A FREQUÊNCIA DE 8 GHz.



FONTE: O autor (2024)

Analisando-se os valores encontrados em relação aos resultados para cada enlace e frequência desprende-se:

Enlace 1 PL – CAR (8,68 km) e modelo de Pompilio:

Para a frequência de 4 GHz, a potência recebida, pelo modelo de Pompilio, foi de -49,14 dBm, proporcionando uma margem de desvanecimento de cerca de 22,85 dB em relação à sensibilidade do receptor que era de -85 dBm para 4 e 5 GHz. Isso indica uma margem de desvanecimento significativa, o que é positivo para garantir uma comunicação robusta e confiável, especialmente em condições desafiadoras de propagação. Análise semelhante vale para os modelos de Weissberguer, Lee e Epstein-Peterson.

Para a frequência de 5 GHz, a potência recebida, pelo modelo de Pompilio, foi de -50,61 dBm, proporcionando uma margem de desvanecimento de cerca de 27,38 dB em relação à sensibilidade do receptor que também era de -85 dBm. Da mesma forma que para 4 GHz, a margem de desvanecimento é substancial, o que é positivo para a confiabilidade da comunicação. Sendo que essa análise também é válida para os modelos de Weissberguer, Lee e Epstein-Peterson.

Para a frequência de 8 GHz, a potência recebida, pelo modelo de Pompilio, foi de -97,81 dBm, proporcionando uma margem de desvanecimento de cerca de 21,57 dB em relação à sensibilidade do receptor que para este caso era de -89 dBm. Apesar de a potência recebida ser menor em relação às frequências mais baixas, a margem de desvanecimento ainda é adequada para garantir uma comunicação confiável.

Enlace 2: CAR – PL (9,09 km) e modelo de Pompilio:

Os resultados para o enlace 2 são semelhantes aos do enlace 1, com margens de desvanecimento adequadas para todas as frequências. Isso indica que, mesmo com uma distância maior, os enlaces continuam a oferecer uma margem de desvanecimento suficiente para garantir uma comunicação robusta.

Enlace 3: PL - PS (17,59 km):

Para o enlace 3, a distância é significativamente maior, o que resulta em potências recebidas menores em todas as frequências. Apesar disso, as margens de desvanecimento ainda são adequadas para garantir uma comunicação confiável, indicando que o sistema é capaz de lidar com enlaces de longa distância.

Os resultados dos enlaces de rádio operando em um município litorâneo demonstram uma margem de desvanecimento adequada. Isso é particularmente importante de se destacar dadas as condições desafiadoras de propagação enfrentadas em ambientes costeiros. As margens de desvanecimento substanciais observadas em todas as frequências (4 GHz, 5 GHz e 8 GHz) indicam uma capacidade robusta do sistema de rádio para superar os desafios associados à proximidade do mar. Esta capacidade é fundamental para assegurar estabilidade do sistema, mesmo em ambientes onde a reflexão e difração de sinais podem ser mais pronunciadas. Assim, os resultados fornecem uma evidência de que o rádio enlace é eficaz, neste cenário costeiro, o que será comprovado mais adiante quando da apresentação dos cálculos de confiabilidade.

Em resumo, os resultados mostram que, mesmo em distâncias variadas e em diferentes frequências, os enlaces apresentam margens de desvanecimento adequadas para garantir confiabilidade de comunicação. Isto é relevante e sugere que o sistema está bem projetado para lidar com as condições específicas de propagação e interferência encontradas em cada enlace e para cada frequência.

4.5 RESULTADOS RELATIVOS AO RUÍDO

4.5.1 Resultados relativos à potência de ruído (Pruído) [dBm]

A potência de ruído é função da densidade espectral e da largura de banda do canal de comunicação. O QUADRO 31 apresenta os valores obtidos para a potência de ruído para as três frequências de operação.

QUADRO 31 – RESULTADOS REFERENTES A POTÊNCIA DE RÚIDO PRESENTE NOS LINKS

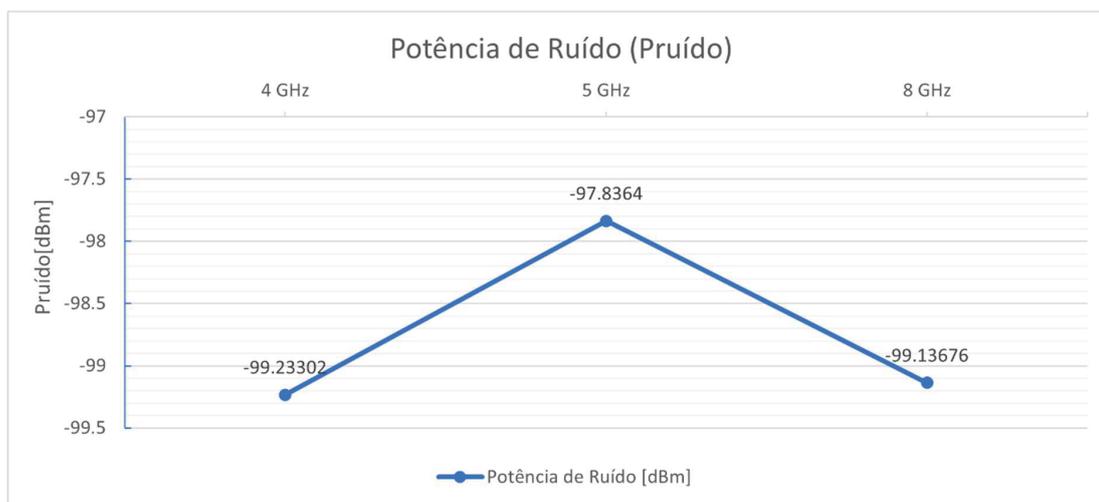
Frequência [GHz]	Largura de Banda [MHz]	Densidade espectral de potência de ruído [J/Hz]	Potência de Ruído [dBm]
4	29	4.1143×10^{-21}	-99,23302
5	40	4.1143×10^{-21}	-97,83640
8	29,65	4.1143×10^{-21}	-99,13676

FONTE: O autor (2024)

Esses são os resultados das potências de ruído para as três frequências distintas, considerando as larguras de banda fornecidas. É importante salientar que a potência de ruído é um fator crucial que impacta na qualidade da comunicação, pois limita a capacidade de discernir o sinal desejado do ruído de fundo. A potência de ruído tende a aumentar com a frequência. Isso pode ser explicado pelo fato de que, em frequências mais elevadas, há uma maior quantidade de energia térmica disponível, o que contribui para a geração de ruído. A potência de ruído também é diretamente proporcional à largura de banda do canal. Isso significa que, quanto maior a largura de banda, maior será a quantidade de ruído presente no canal. A densidade espectral de potência de ruído é uma medida da quantidade de ruído presente em uma determinada frequência. No caso em questão, a densidade espectral de ruído é a mesma para todas as frequências analisadas. Dos resultados obtidos conclui-se que os valores obtidos para a potência de ruído são baixos, o que consequentemente mostra que o ruído presente no canal é extremamente baixo e que este pode ser considerado aceitável para a maioria das aplicações.

No entanto, é importante considerar a relação entre a potência de ruído e a SNR para garantir a qualidade da comunicação. A escolha da frequência de operação deve levar em consideração diversos fatores, como a potência de ruído, a SNR desejada e a taxa de dados necessária. A partir dos resultados apresentados no QUADRO 31 e visualizados pelo GRÁFICO 13 pode-se ter uma ideia dessa distribuição de potência pelo espectro considerado.

GRÁFICO 13 – RESULTADOS REFERENTES À POTÊNCIA DE RUÍDO PARA AS FREQUÊNCIAS ESTUDADAS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.2 Resultados relativo à relação sinal/ruído (RSR) [dB]

A relação sinal/ruído (RSR), como precedentemente explicado é crucial para avaliar a qualidade de um sistema pois, representa uma relação entre a potência do sinal desejado e a potência do ruído presente no sistema. É a partir da análise da RSR que se pode ter ideia da confiabilidade da comunicação bem como da clareza do sinal trafegando pelo sistema. Assim, os resultados obtidos utilizando-se a Equação (2.25) estão sumarizados da seguinte maneira:

O QUADRO 32 apresenta o resultado da (RSR) para as três frequências de operação do enlace válidos para todos os trechos no sentido de transmissão.

QUADRO 32 – RESULTADO DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO (RSR_saída) [dB]

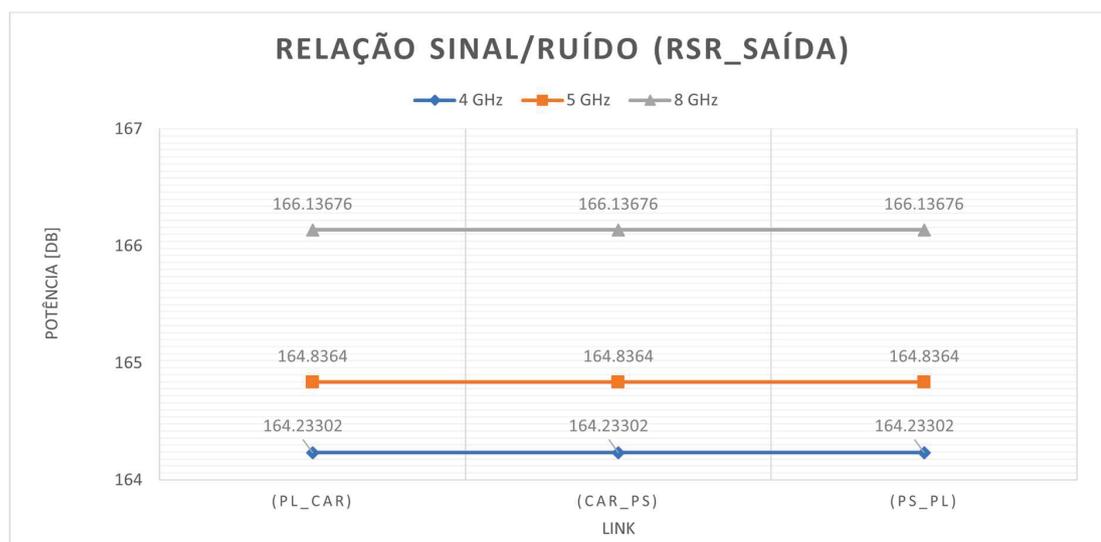
Frequência [GHz]	<i>RSR_saída</i> <i>Link 1</i> <i>(PL_CAR)</i>	<i>RSR_saída</i> <i>Link 2</i> <i>(CAR_PS)</i>	<i>RSR_saída</i> <i>Link 3</i> <i>(PS_PL)</i>
4	164,23302	164,23302	164,23302
5	164,83640	164,83640	164,83640
8	166,13676	166,13676	166,13676

FONTE: O autor (2024)

Relativo à discrepância na RSR para 8 GHz em comparação com as outras frequências, as explicações seriam as seguintes: Uma maior atenuação em

frequências mais altas, uma maior sensibilidade do receptor à ruídos nas frequências mais altas ou mesmo a interferência de outras fontes em frequências adjacentes. O GRÁFICO 14 mostra os resultados obtidos para a relação sinal/ruído de saída do sistema.

GRÁFICO 14 – RESULTADOS REFERENTES À POTÊNCIA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE SAÍDA PARA OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

O QUADRO 33 apresenta o resultado da (RSR) para as três frequências de operação do enlace válidos para todos os trechos no sentido de recepção.

QUADRO 33 - RESULTADO DA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO (RSR_entrada) [dB]

Frequência [GHz]	<i>RSR_entrada</i> <i>Link 1</i> (PL_CAR)	<i>RSR_entrada</i> <i>Link 2</i> (CAR_PS)	<i>RSR_entrada</i> <i>Link 3</i> (PS_PL)
4	80,08444	79,66877	73,84352
5	77,22292	76,77232	70,46829
8	31,31960	41,69133	24,71901

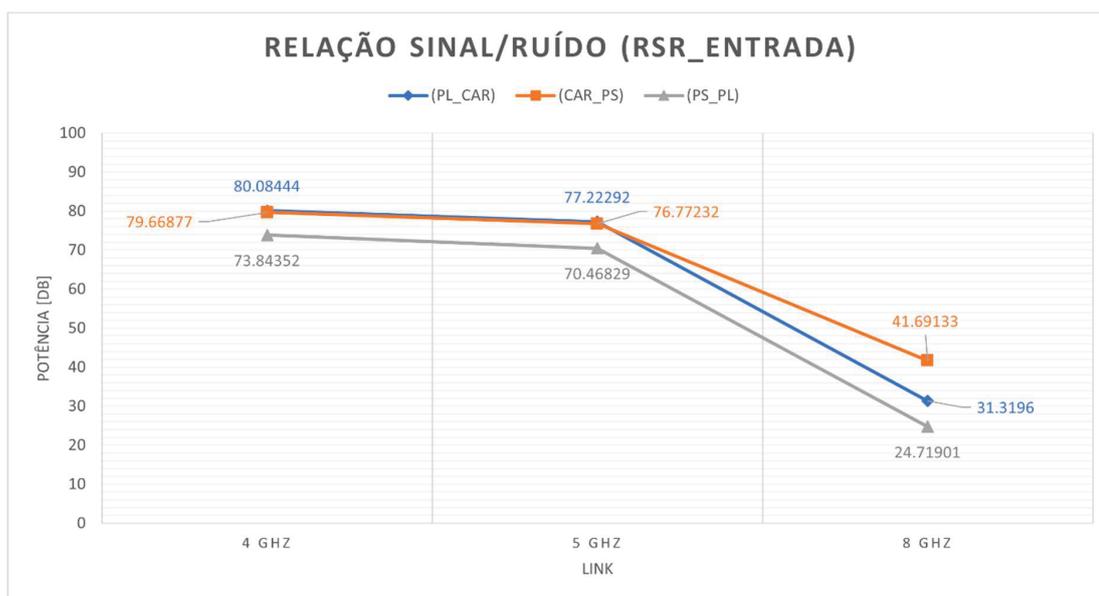
FONTE: O autor (2024)

Analisando-se os resultados obtidos para a potência de ruído e potência total, correlacionando esses fatores e discutindo a discrepância observada para a frequência de 8 GHz tem-se que a RSR é uma medida da relação entre a potência total do sinal e a potência de ruído presente no sistema. No que tange a potência de

ruído e potência total, tem-se que a potência de ruído representa a energia proveniente de fontes de ruído presentes no sistema de comunicação e a potência total é a soma da potência do sinal desejado e da potência de ruído. Em um sistema ideal, é desejável maximizar a potência do sinal desejado e minimizar a potência de ruído para obter uma boa qualidade de comunicação.

Em resumo, a análise dos resultados indica a importância da relação entre a potência do sinal desejado e a potência de ruído para a qualidade da comunicação. A discrepância observada para 8 GHz destaca a complexidade e a variabilidade dos sistemas de comunicação em diferentes frequências e ambientes. O GRÁFICO 15 mostra os resultados obtidos para a relação sinal/ruído de entrada do sistema.

GRÁFICO 15 – RESULTADOS REFERENTES À POTÊNCIA RELAÇÃO SINAL/RUÍDO DE ENTRADA PARA OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.3 Resultados relativos ao Fator de Ruído (FR)

O Fator de Ruído por sua vez, representa a razão entre a relação sinal ruído ($RSR_{entrada}$) pela ($RSR_{saída}$). Quanto menor for o valor dessa relação, melhor, pois indica que o sinal desejado é mais forte em relação ao ruído. Assim, os resultados obtidos pelo uso da EQUAÇÃO (2.26) estão resumidos da seguinte maneira:

QUADRO 34 - FATOR DE RUÍDO (FR)

Frequência [GHz]	Link 1 (PL_CAR)	Link 2 (CAR_PS)	Link 3 (PS_PL)
4	0,48762	0,48509	0,44962
5	0,45044	0,44781	0,41104
8	0,18627	0,24796	0,14701

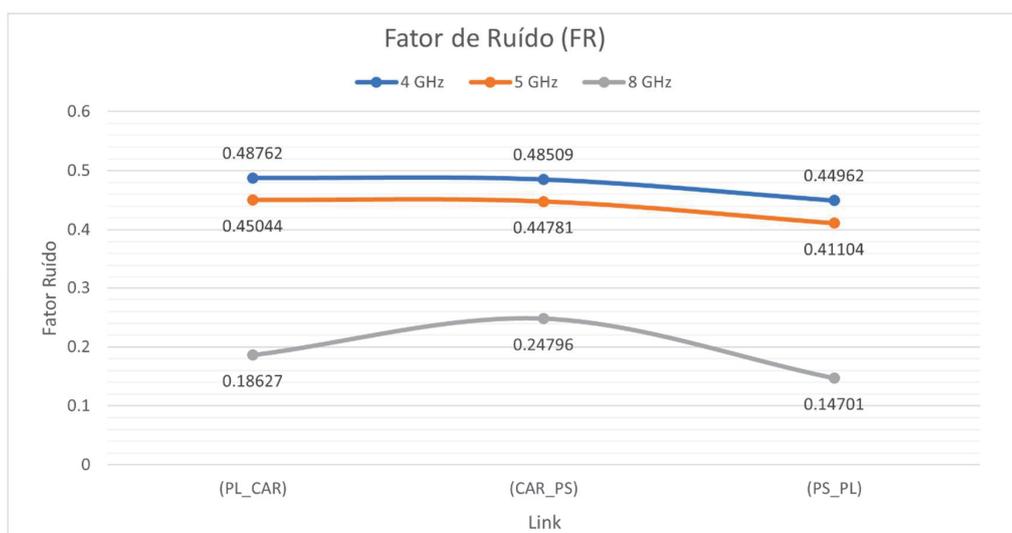
FONTE: O autor (2024)

Quanto maior o FR, melhor a relação sinal-ruído (SNR), indicando um sinal mais forte em relação ao ruído. Logo, um FR menor indica uma SNR mais fraca, com o sinal desejado mais próximo do nível de ruído.

Enquanto os valores de FR para 4 GHz e 5 GHz estão em torno de 0,4, o FR para 8 GHz é maior, aproximadamente 0,1. Isso sugere que, em 8 GHz, a relação sinal-ruído é mais favorável do que para as outras frequências.

Uma possível explicação para essa discrepância é que, para 8 GHz, a potência do sinal desejado pode ser relativamente mais alta em comparação com a potência de ruído em relação às outras frequências. Isso pode ser devido a uma variedade de fatores: como a natureza do ambiente de comunicação, a presença de interferências específicas ou características do sistema de transmissão e recepção. Através da análise do GRÁFICO 16 pode-se ter uma visão mais clara do ocorrido.

GRÁFICO 16 – RESULTADOS REFERENTES AO FATOR DE RUÍDO PARA OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.4 Determinação do valor de sistema (VS) [dBm]

O valor do sistema refere-se ao ideal da relação sinal-ruído que seria alcançado na saída do transmissor, presumindo que a relação entre transmissor e receptor ocorra em um meio sem perdas, com a premissa de que o transmissor esteja livre de ruídos. Com base nessa informação, os resultados obtidos pela EQUAÇÃO (2.27) são resumidos no QUADRO 35.

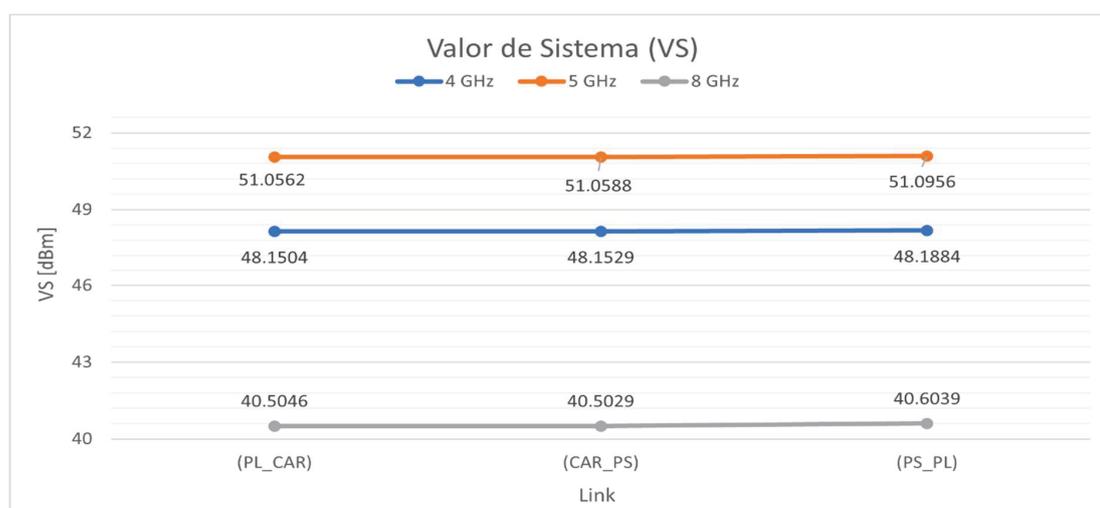
QUADRO 35 - RESULTADOS REFERENTES AO VALOR DE SISTEMA DOS LINKS.

Frequência [GHz]	Valor de Sistema [dBm]		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	48,1504	48,1529	48,1884
5	51,0562	51,0588	51,0956
8	40,5046	40,5029	40,6039

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 17 permite verificar que para os *links* PL-CAR, CAR-PS e PS-PL para as frequências de apontamento, o valor do sistema encontra-se acima do valor máximo de todas as potências transmitidas. Isto significa que o sistema apresenta comportamento estável e livre de interferências.

GRÁFICO 17 – RESULTADOS REFERENTES AO VALOR DE SISTEMA PARA OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.5 Determinação do nível de ruído térmico (RT) [dBm]

Os resultados para o ruído térmico foram obtidos tendo como base a EQUAÇÃO (2.28) e estão apresentados no QUADRO 36. Desprende-se que quanto mais negativo o valor em dBm, menor é a potência do ruído.

A relação entre a potência do ruído térmico e a frequência é diretamente proporcional. Isso significa que, em frequências mais altas, a potência do ruído térmico tende a ser maior. Isso ocorre porque a agitação térmica dos elétrons aumenta com a frequência.

Portanto, ao comparar os valores de ruído térmico em 4 GHz, 5 GHz e 8 GHz, é de se esperar que o valor em 4 GHz seja o mais negativo (-158,87 dBm), seguido por 5 GHz (-97,51 dBm) e 8 GHz (-99,02 dBm). Isso indica que, à medida que a frequência aumenta, a potência do ruído térmico também aumenta.

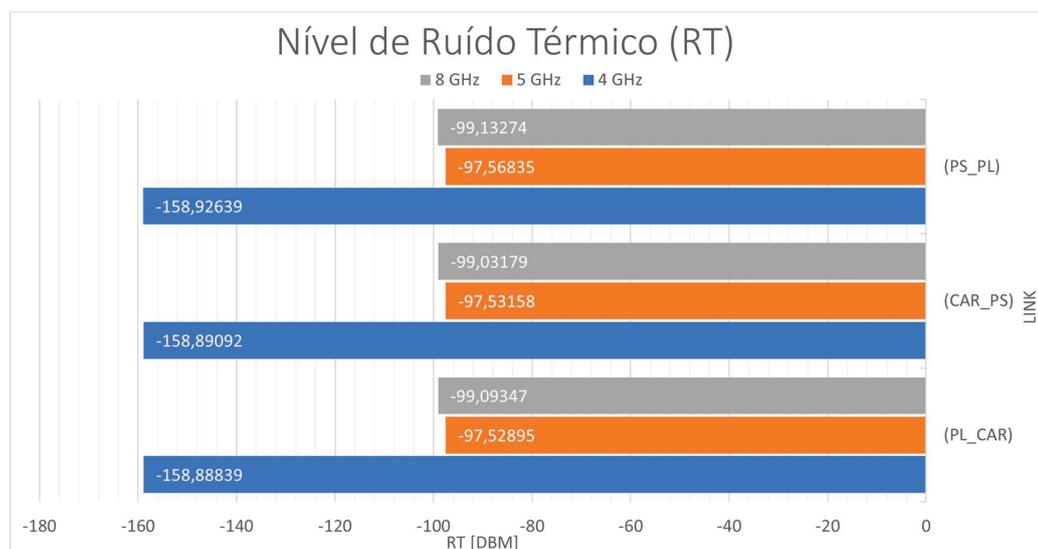
QUADRO 36 - RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO NOS LINKS.

Frequência [GHz]	Valor do nível de ruído térmico [dBm]		
	<i>Link 1 (PL-CAR)</i>	<i>Link 2 (CAR-PL)</i>	<i>Link 3 (PL-PS)</i>
4	-158,88839	-158,89092	-158,92639
5	-97,52895	-97,53158	-97,56835
8	-99,09347	-99,03179	-99,13274

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 18 mostra que o nível de ruído térmico presente no sistema em operação normal é extremamente baixo.

GRÁFICO 18 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.6 Determinação do ruído térmico para 50% e 80% do tempo

O ruído térmico para valores de 50% e 80% do tempo foi calculado tendo como base a EQUAÇÃO (2.29), a EQUAÇÃO (2.30) e os resultados estão resumidos no QUADRO 37 e QUADRO 38, respectivamente.

QUADRO 37 - RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 50% DO TEMPO NOS LINKS.

Frequência [GHz]	Valor do nível de ruído térmico 50% do tempo [dBm]		
	Link 1(PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	-79,444197	-79,445462	-79,463197
5	-48,764477	-48,765791	-48,784177
8	-49,546739	-49,515896	-49,566368

FONTE: O autor (2024)

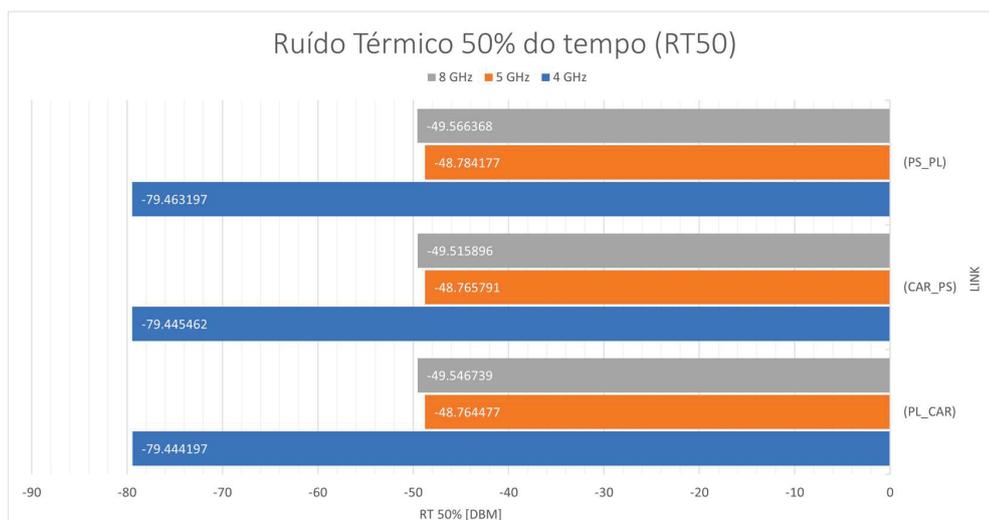
QUADRO 38 - RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 80% DO TEMPO NOS LINKS.

Frequência [GHz]	Valor do nível de ruído térmico 80% do tempo [dBm]		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	-127,09902	-127,10105	-127,17814
5	-78,01196	-78,01407	-78,04348
8	-79,21959	-79,22543	-79,30619

FONTE: O autor (2024)

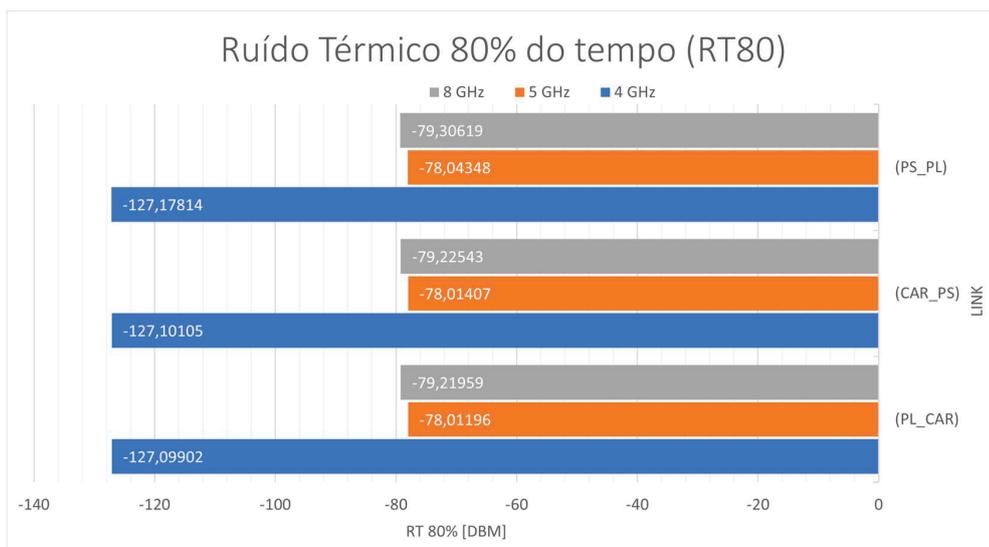
O GRÁFICO 19 e o GRÁFICO 20 mostram o comportamento do ruído térmico do sistema para 80 e 50% do tempo.

GRÁFICO 19 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 50% DO TEMPO PARA OS LINKS.



FONTE: O AUTOR (2024)

GRÁFICO 20 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TÉRMICO PARA 50% DO TEMPO PARA OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.7 Resultados calculados para o ruído de eco (RE) [dB]

A propensão a interferências causadas pelo ruído de eco é mais elevada em ambientes costeiros, especialmente em áreas muito próximas ao mar. Isso ocorre devido a possíveis reflexões, como as causadas por ventos marítimos sobre as antenas o que pode vir a causar possíveis desajustes no sistema de guia de ondas.

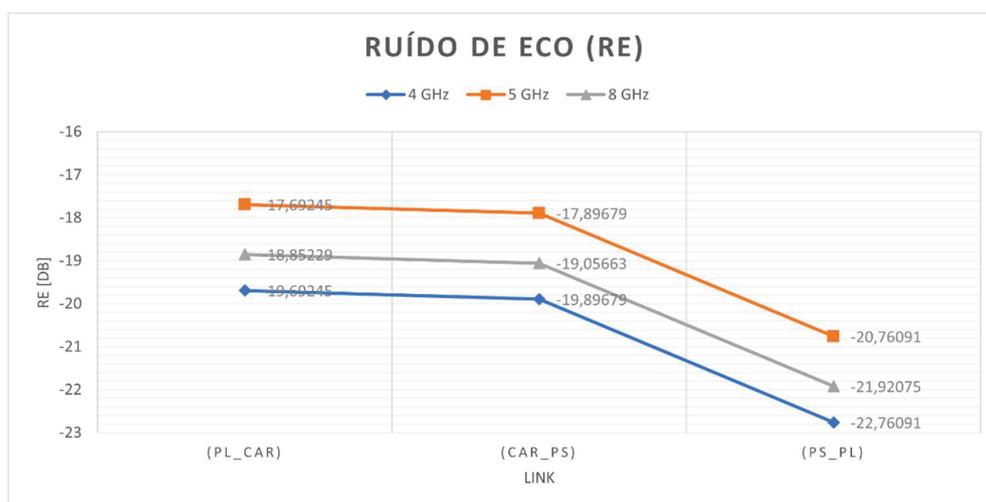
Os resultados obtidos para o ruído de eco estão resumidos no QUADRO 39. Importante destacar que a EQUAÇÃO (2.32) foi empregada para este cálculo.

QUADRO 39 - RESULTADO REFERENTE AO RUÍDO DE ECO PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS

Frequência [GHz]	Valor do nível de ruído de eco [dB]		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	-19,69245	-19,89679	-22,76091
5	-17,69245	-17,89679	-20,76091
8	-18,85229	-19,05663	-21,92075

FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 21 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO DE ECO PARA TODOS OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

Os dados apresentados no GRÁFICO 21 indicam que a potência do ruído de eco aumenta com o aumento da frequência. Isto se explica pelo fato de que em frequências mais elevadas, ocorre maior atenuação do sinal e, portanto, maior probabilidade de reflexão por objetos no ambiente, como partículas de água e sal em

áreas costeiras. Observando-se os resultados obtidos, a potência de ruído de eco é maior em 8 GHz. Destaca-se que a potência de ruído de eco também tende a aumentar com a distância percorrida pelo sinal. Isso ocorre porque o sinal se propaga e se atenua ao longo do caminho, tornando-se mais suscetível a reflexões por obstáculos no ambiente.

4.5.8 Resultados calculados para a relação portadora/ruído (C/N) [dB]

Os resultados obtidos para a relação portadora/ruído (C/N) foram obtidos pelo uso da EQUAÇÃO (2.33) e são resumidos no QUADRO 40. Os valores obtidos de relação C/N em dB para as frequências de 4 GHz, 5 GHz e 8 GHz são praticamente todos iguais, sendo de 2,8 dB. Uma relação C/N positiva indica que a potência do sinal da portadora é maior do que a potência do ruído, o que é desejável para uma boa qualidade de comunicação. No entanto, obteve-se uma relação C/N de apenas 2,8 dB que se sabe é bastante baixa e pode indicar uma qualidade de sinal marginal. A razão para os valores iguais de relação C/N em diferentes frequências foi devido a quase igualdade de potências aplicadas ao sistema, pois se as potências dos sinais de portadora e ruído forem muito semelhantes em todas as frequências, a relação C/N será a mesma. Uma segunda hipótese para a obtenção desses baixos valores foram as limitações do sistema que utilizou uma base de dados pouco abrangente, mas que serviu para validar os resultados obtidos. Em suma, é importante notar que uma relação C/N de 2,8 dB é bastante baixa para garantir uma boa qualidade de sinal em um sistema de comunicação. Geralmente, valores mais altos de relação C/N são preferíveis para garantir uma comunicação confiável e sem erros, no entanto detectou-se presença de sinal maior do que o próprio ruído.

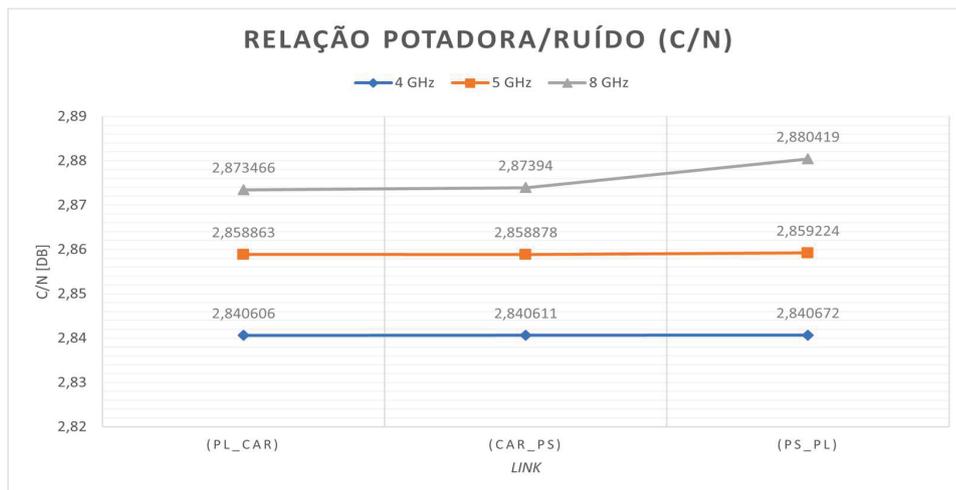
QUADRO 40 - RESULTADO REFERENTE AO CÁLCULO DA PORTADORA/RUÍDO PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS

Frequência [GHz]	Valor da relação portadora/ruído [dB]		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	2,840606	2,840611	2,840672
5	2,858863	2,858878	2,859224
8	2,873466	2,873940	2,880419

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 22 mostra para cada um dos *links* considerados o valor dessa relação. Mesmo possuindo uma relação baixa pode-se observar que existe qualidade de sinal, ainda que marginal, o que não inviabiliza o prosseguimento das análises.

GRÁFICO 22 – RESULTADOS REFERENTES AO CÁLCULO DA PORTADORA/RUÍDO PARA TODOS OS LINKS.

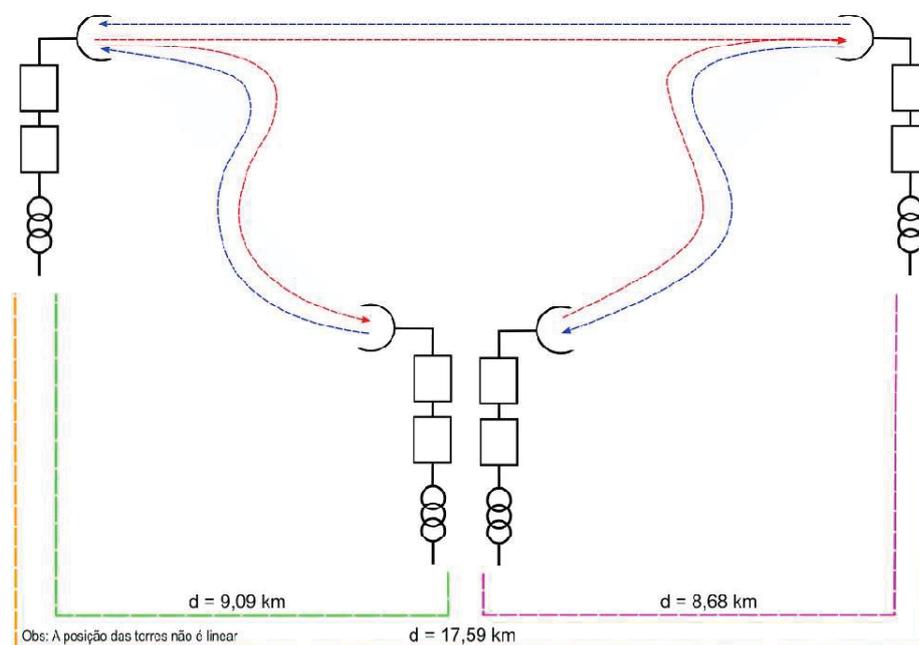


FONTE: O autor (2024)

4.5.9 Resultados do ruído interferente devido a polarização paralela (RI_{PP}) [dB]

O ruído interferente proveniente da polarização paralela (RI_{PP}) atua como uma medida preventiva, especialmente quando os *links* de transmissão compartilham a mesma faixa de operação e utilizam antenas com a mesma orientação de polarização, seja vertical ou horizontal. Com base nessas considerações, tornou-se importante analisar esse tipo de ruído, cujos resultados são apresentados a seguir. A FIGURA 9 ilustra a análise do ruído interferente devido a polarização paralela e o QUADRO 41 apresenta os resultados obtidos pelo uso das EQUAÇÕES (2.34) e (2.35).

FIGURA 9 - REPRESENTA A ANÁLISE DO RUÍDO DEVIDO À POLARIZAÇÃO PARALELA



FONTE: O autor (2024)

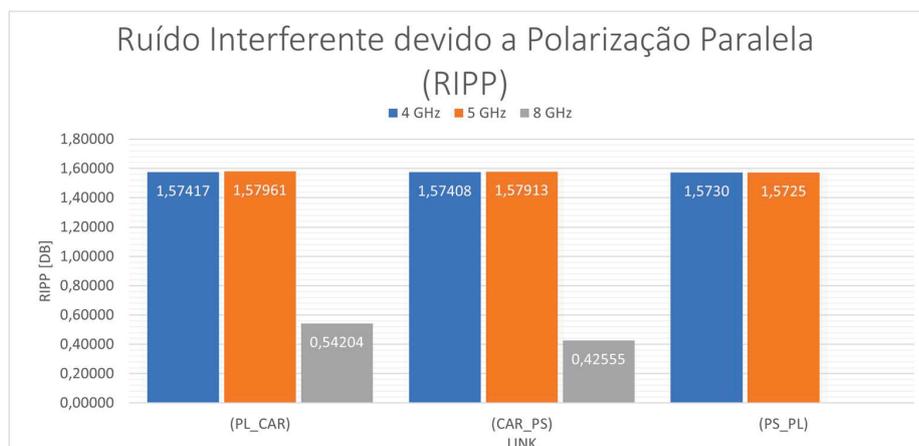
Desprende-se pela análise da FIGURA 9 que o ruído interferente por polarização paralela deve atuar de modo uniforme sobre o sistema. A título de exemplo destaca-se que este atua na saída do sinal da antena em Praia de Leste – Carmeri e de Carmeri até Pontal do Sul. Em princípio, para as frequências de 4 e 5 GHz este sinal não deve ser atenuado por este tipo de ruído. No entanto, para a frequência de 8 GHz onde o sinal está no limite da degradação, é possível que o mesmo seja perdido ao longo desse trajeto. Os valores obtidos referentes ao ruído interferente por polarização paralela RI_{PP} para todo o link são mostrados no QUADRO 41.

QUADRO 41 – RESULTADOS DO RI_{PP} [dB] PARA TODOS OS LINKS E PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS

Frequência [GHz]	Ruído interferente devido a polarização paralela RI_{PP}		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	1,574166	1,574084	1,572960
5	1,579611	1,579131	1,572490
8	0,542041	0,425550	-

FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 23 – RESULTADOS REFERENTES DA INTERFERÊNCIA DEVIDO A POLARIZAÇÃO PARALELA DE TODOS OS *LINKS*.



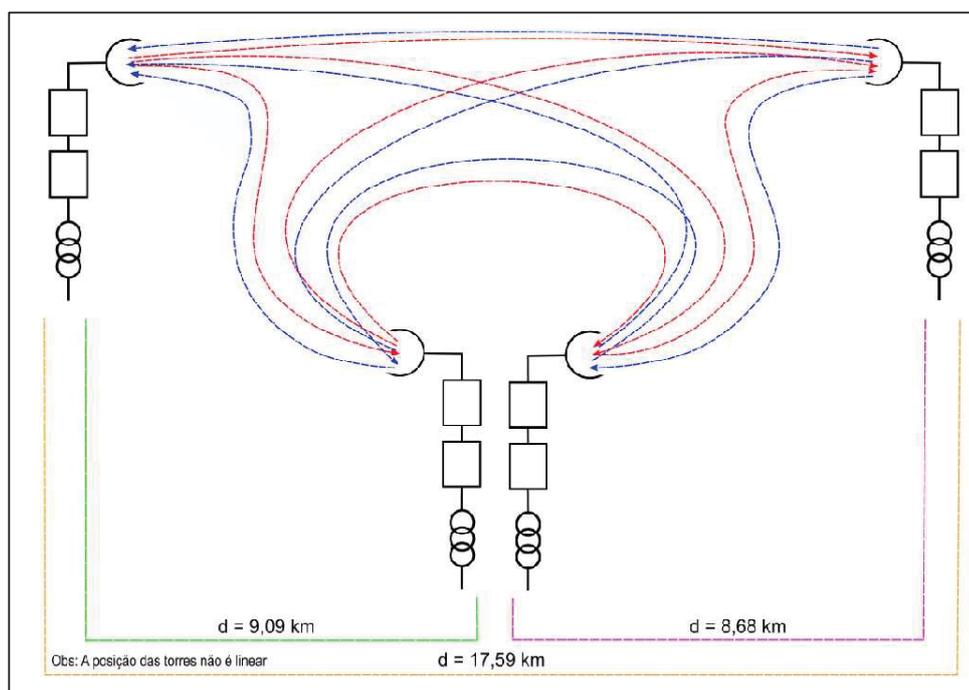
FONTE: O autor (2024)

A análise do GRÁFICO 23 mostra que efetivamente a frequência de 8 GHz não consegue manter níveis de sinal que possam ser considerados úteis para a sequência do projeto em se tratando desse ruído por polarização paralela. No entanto, para o cálculo subsequente da polarização cruzada, onde se utiliza a polarização cruzada das antenas, espera-se, ser possível a detecção desse nível de interferência.

4.5.10 Resultados do ruído interferente devido a polarização cruzada (RI_{PC}) [dB]

Assim como o cálculo do RI_{PP} , a determinação do ruído devido a polarização cruzada (RI_{PC}) é crucial. O que deve ser destacado quando da análise do (RI_{PC}) é que este deve levar em consideração o ruído provocado pela transmissão de um sinal não só na saída, mas na chegada do mesmo em todas as antenas. Ou seja, este é o tipo de ruído que existe em todo o sistema. A FIGURA 10 ilustra a análise do ruído interferente devido à polarização cruzada. Este ruído, só faz sentido se todas as polarizações possíveis da antena estiverem sendo utilizados. Ao se utilizar todas as possíveis configurações da antena, eleva-se a capacidade do sistema de transmissão de suportar elevadas taxas de transmissão e serviços diferenciados justamente pelo uso da técnica de utilizar antenas com polarizações alternadas. Isso garante uma eficiência maior para o sistema, embora haja um aumento na vulnerabilidade das interferências entre os *links*. O QUADRO 42 apresenta os resultados obtidos pelo uso das EQUAÇÕES (2.36) e (2.37):

FIGURA 10 - REPRESENTA A ANÁLISE DO RÚIDO INTERFERENTE DEVIDO À POLARIZAÇÃO CRUZADA



FONTE: O autor (2024)

Para a determinação do RIPC para as frequências de 4 e 5 GHz utilizou-se os valores de polarização cruzada fornecidos pelo fabricante da antena *High XPD Antenna, dual-polarized, 4,4 – 5 GHz, Gain 36,8 dBi*. Ele foi válido para a antena *High Performance Low Profile Antenna, single polarized, 7.100–8.500 GHz, PBR84 flange, Gain 32,2 dBi* que são respectivamente: 20 dB, 25 dB e 22 dB.

QUADRO 42 - RESULTADOS DO RIPC [dB] PARA TODOS OS LINKS E PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS

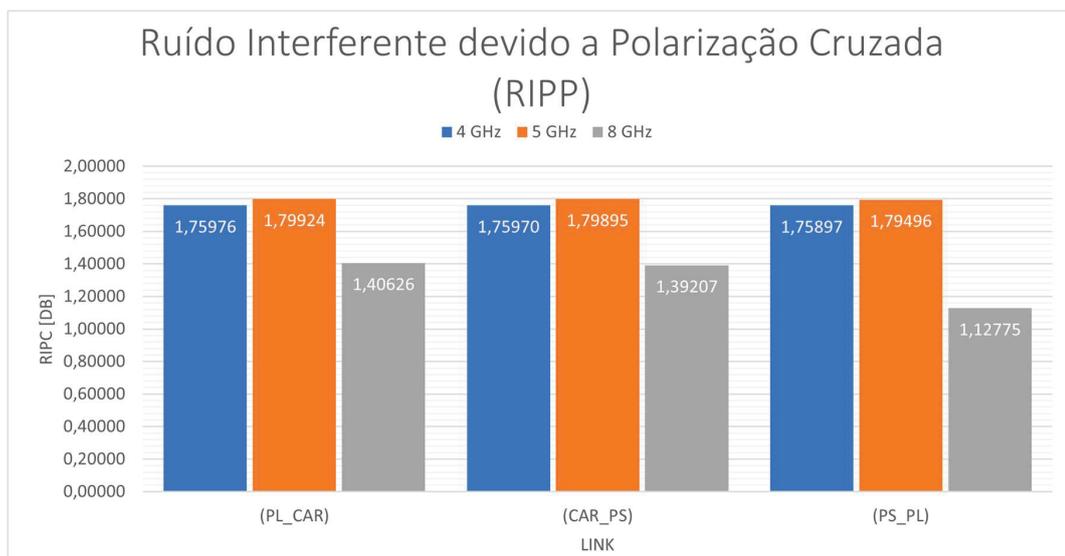
Frequência [GHz]	Ruído interferente devido a polarização cruzada		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	1,759755	1,759703	1,758969
5	1,799236	1,798947	1,794956
8	1,406262	1,392065	1,127753

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 24 mostra que o uso de todas as polarizações possíveis das antenas dentro do *link* aumenta o desempenho do sistema com resposta para todas

as frequências e em toda a extensão do enlace. O que leva a conclusão de que o ruído interferente por polarização cruzada representa um indicador da qualidade.

GRÁFICO 24 – RESULTADOS REFERENTES DA INTERFERÊNCIA DEVIDO A POLARIZAÇÃO CRUZADA DE TODOS OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.5.11 Determinação do ruído total do sistema (R_{total})[dB]

O ruído total sofrido pelo sistema representa uma composição de todas as possíveis interferências sobre o sinal transmitido. O ruído total foi determinado pelo uso da EQUAÇÃO (2.38), aonde todos os fatores que poderiam degradar a qualidade do sinal foram então determinados. O QUADRO 43 apresenta todos os resultados obtidos para o ruído total sobre o sistema.

QUADRO 43 - RESULTADOS DO R_{total} [dB] PARA TODOS OS LINKS E PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS

Frequência [GHz]	Ruído total [dB]		
	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
4	-174,759296	-155,072041	-155,144838
5	-111,392111	-111,602472	-114,550768
8	-115,811191	-116,022842	-

FONTE: O autor (2024)

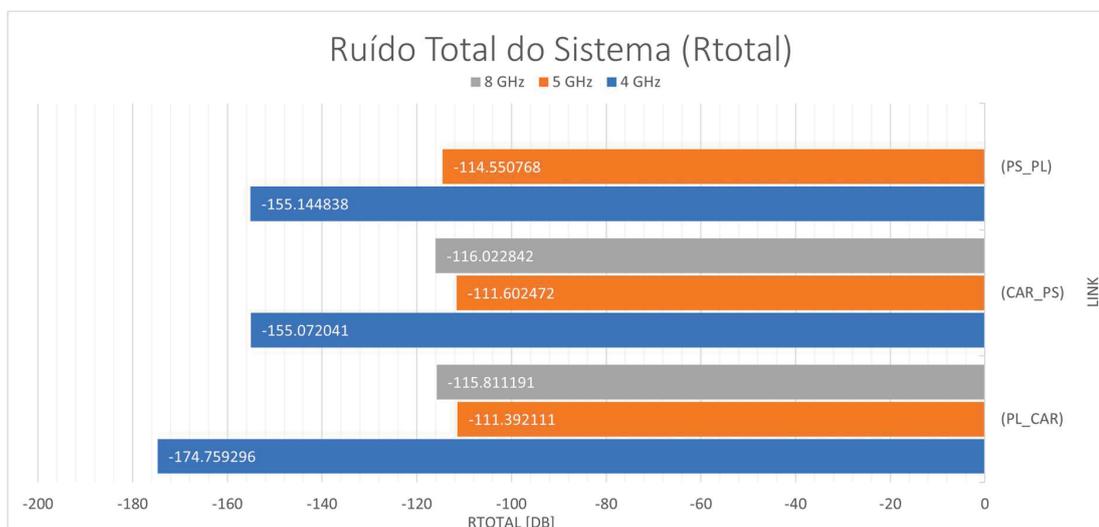
O GRÁFICO 25 mostra os resultados obtidos do ruído total do sistema para as frequências de 4 GHz e 5 GHz válida para os três *links* PL-CAR, CAR-PL e PL-PS. No entanto para a frequência de 8 GHz esse valor cai excessivamente a ponto de o equipamento utilizado não conseguir detectar o valor do ruído total para essa frequência. Uma análise mais detalhada desses resultados é crucial para se compreender o comportamento do sistema. Como o ruído total é significativamente menor em 8 GHz do que em 4 GHz para as distâncias de 8,68 km e 9,09 km.

Essa diferença pode ser explicada por uma maior atenuação do sinal em 4 GHz, levando a uma maior proporção de ruído no sinal recebido ou uma menor largura de banda em 4 GHz, limitando a capacidade de comunicação e aumentando a probabilidade de interferência.

Sabe-se, contudo, que o ruído total do sistema tende a aumentar com a distância percorrida pelo sinal em ambas as frequências. Isso ocorre pela atenuação do sinal ao longo da trajetória, tornando-o mais suscetível ao ruído ambiental. No entanto, a falta de valor para o ruído total em 17 km e 8 GHz pode ser explicada por uma atenuação excessiva do sinal, tornando-o irrecuperável e inviabilizando a medição do ruído ou as limitações do equipamento de medição em lidar com sinais muito fracos.

Em conclusão, a análise dos resultados demonstra a importância de considerar a frequência, a distância e outros fatores ao avaliar o ruído total do sistema de modo a garantir uma comunicação confiável e de alta qualidade.

GRÁFICO 25 – RESULTADOS REFERENTES AO RUÍDO TOTAL DO SISTEMA DE TODOS OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.6 RESULTADOS RELATIVOS À CONFIABILIDADE

4.6.1 Resultados referentes à inoperância do sistema (IS) [%]

A temperatura média anual em Pontal do Paraná é de 22°C, o que equivale a 295 K. No entanto, a temperatura varia ao longo do ano e ao longo do dia. A EQUAÇÃO (2.39) permite a determinação da probabilidade de inoperância do sistema de modo percentual e os resultados obtidos para $k=4/3$ são mostrados no QUADRO 44. Para esta determinação considerou-se que as antenas estavam a 35 m de altura em relação ao solo, o fator de curvatura da terra foi estabelecido em $k=4/3$ e o gradiente de refatividade foi obtido através da Equação (2.40) com valor $dN1=2,94695E-06$ [K/m].

QUADRO 44 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA [%].

Probabilidade de inoperância [%]	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PS)	Link 3 (PS-PL)
K (4/3)	0,000039811		

FONTE: O autor (2024)

Destaca-se do resultado obtido que a probabilidade de inoperância do sistema, nas condições de projeto tri-frequencial é extremamente baixa.

4.6.2 Probabilidade de inoperância por desvanecimentos não seletivos (PI) [%]

Os valores referentes à probabilidade de inoperância devido ao desvanecimento não seletivo foram calculados com base na EQUAÇÃO (2.41). Neste cálculo, levou-se em consideração o limiar de recepção com a maior margem de tolerância específica para cada frequência de operação. Os resultados obtidos de PI para os três *links* que compõem este estudo encontram-se no QUADRO 45.

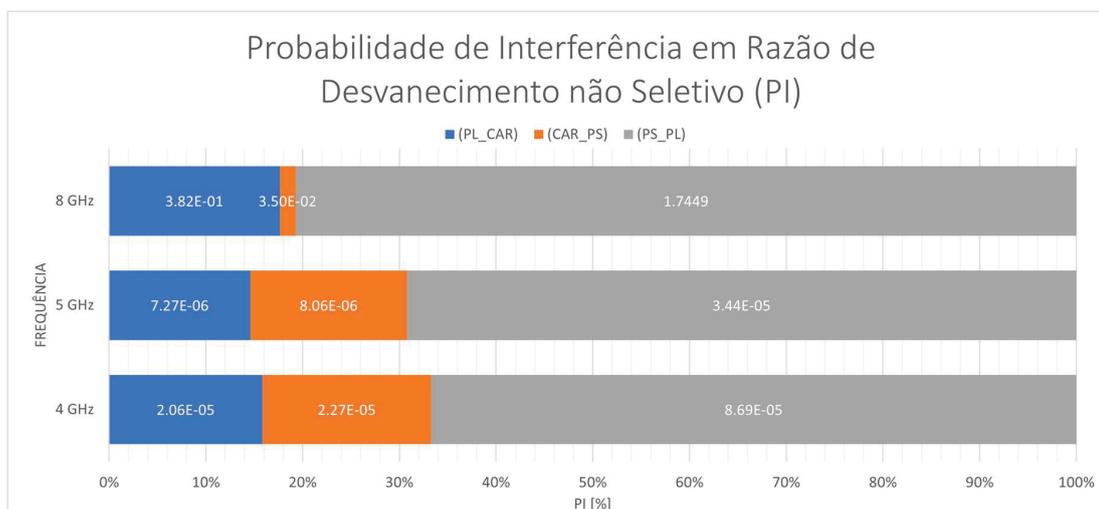
QUADRO 45 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS NÃO SELETIVOS (PI) [%].

Probabilidade de inoperância por desvanecimento não seletivo (PI) [%]	Frequência [GHz]	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PS)	Link 3 (PS-PL)
	4	2,0647E-05	2,2721E-05	8,6886E-05
	5	7,2669E-06	8,0614E-06	3,4420E-05
	8	3,8169E-01	3,5038E-02	1,7449

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 26 mostra os resultados referentes à probabilidade de interferência em razão de desvanecimentos não seletivos que normalmente são valores baixos. No entanto para a frequência de 8 GHz este valor mostra uma alta probabilidade de ocorrência dessa interferência, mas acredita-se que seja devido a própria degradação do sinal existente em 8 GHz.

GRÁFICO 26 – RESULTADOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS NÃO SELETIVOS DE TODOS OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

4.6.3 Probabilidade de inoperância por desvanecimentos seletivos (PS) [%]

Os valores obtidos referentes à probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo utilizando-se a EQUAÇÃO (2.42) e encontram-se apresentados no QUADRO 46.

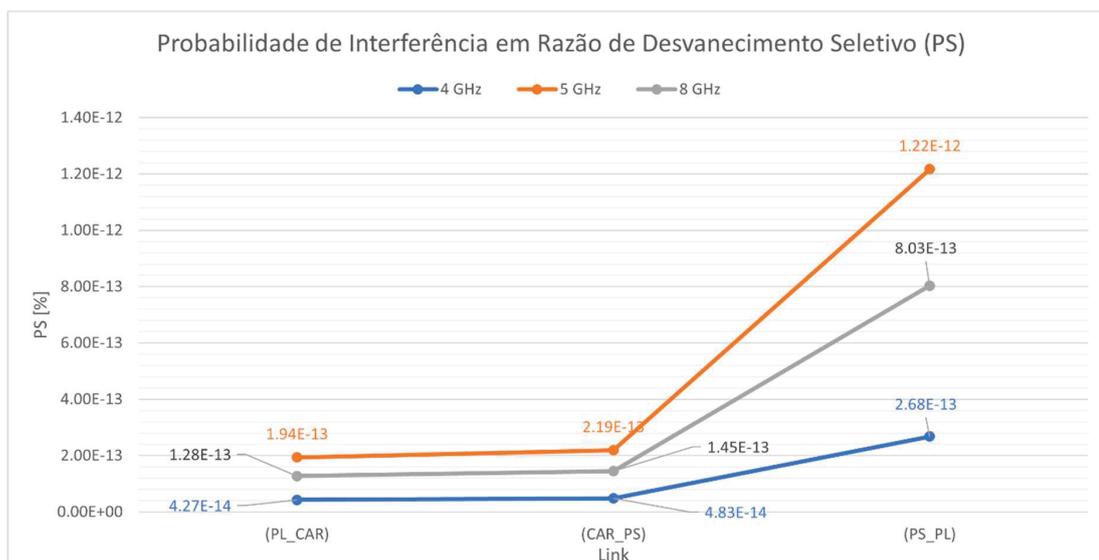
QUADRO 46 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS SELETIVOS (PS) [%].

Probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo [tempo em %]	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PS)	Link 3 (PS-PL)
PS (4 GHz)	4,274E-14	4,830E-14	2,683E-13
PS (5 GHz)	1,9388E-13	2,1911E-13	1,2171E-12
PS (8 GHz)	1,2799E-13	1,4465E-13	8,0349E-13

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 27 mostra os resultados referentes à ocorrência desta probabilidade. Observa-se também que no município de Pontal do Paraná a temperatura média anual não sofre grandes variações, o que de certa forma diminui a probabilidade de ocorrência de desvanecimentos seletivos sobre o *link*.

GRÁFICO 27 – RESULTADOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA EM RAZÃO DE DESVANECIMENTOS SELETIVOS DE TODOS OS LINKS.



FONTE: O AUTOR (2024)

4.6.4 Valores referentes a probabilidade de inoperância minutos por ano ($P_{I\mu}$) [%]

Os resultados obtidos para a probabilidade de inoperância em minutos por ano foram obtidos pelo uso da EQUAÇÃO (2.45). Para este cálculo também se considerou o limiar de recepção com maior margem de tolerância respectivo para cada frequência de operação. Os resultados obtidos encontram-se no QUADRO 47.

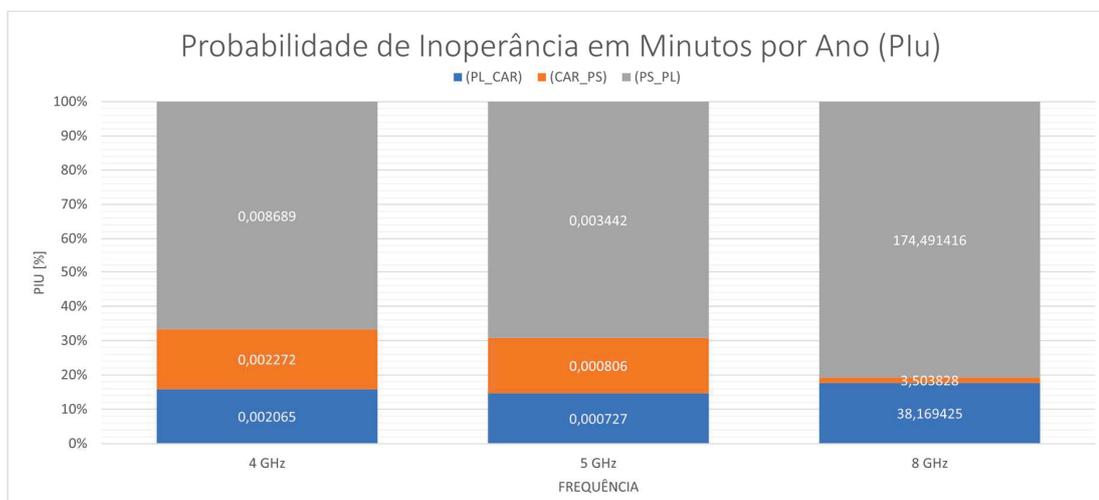
QUADRO 47 - RESULTADOS DÀ PROBABILIDADE DO PERÍODO DE INOPERÂNCIA EM MINUTOS POR ANO ($P_{I\mu}$) [%]

Probabilidade do período inoperância em minutos por ano ($P_{I\mu}$) [%]	Frequência [GHz]	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PS)	Link 3 (PS-PL)
	4	0,002065	0,002272	0,008689
	5	0,000727	0,000806	0,003442
	8	38,169425	3,503828	174,491416

FONTE: O autor (2024)

O GRÁFICO 28 demonstra esta probabilidade de inoperância em minutos por ano para todos os *links*.

GRÁFICO 28 – RESULTADOS REFERENTES A PROBABILIDADE DE INOPERÂNCIA EM MINUTOS POR ANO DE TODOS OS *LINKS*.



FONTE: O autor (2024)

4.6.5 Determinação da confiabilidade (C) [%]

A confiabilidade de um *link* de transmissão refere-se à capacidade do sistema de desempenhar suas funções dentro de limites e condições operacionais por longos períodos. No entanto, a determinação precisa dessa confiabilidade é desafiada por vários fatores, como, a correta determinação de todas as possíveis inoperâncias que o sistema pode sofrer dentro de um intervalo de tempo específico. Os resultados de confiabilidade foram obtidos pelo uso da EXPRESSÃO (2.46) e encontram-se apresentados no QUADRO 48.

QUADRO 48 - RESULTADOS OBTIDOS REFERENTES À CONFIABILIDADE (C) [%]

	Frequência [GHz]	Link 1 (PL-CAR)	Link 2 (CAR-PS)	Link 3 (PS-PL)
Confiabilidade (C) [%]	4	99,997935	99,997728	99,991311
	5	99,999273	99,999194	99,996558
	8	61,830575	96,496172	-74,491416

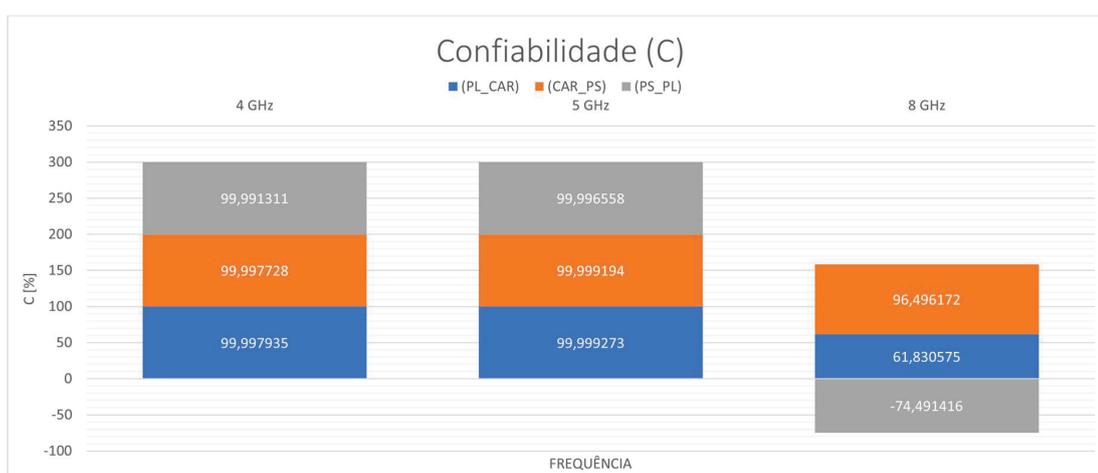
FONTE: O autor (2024)

De acordo com a norma ITU-T G.821 e a Resolução nº 715 de 23/10/2019 da Anatel (2019), um sistema eficiente deve operar corretamente ao longo de todo o intervalo de tempo. Normalmente, utiliza-se como referência que o sistema funcione

com uma porcentagem superior a 90%. Observa-se do QUADRO 48 que apenas para a frequência de 8 GHz a taxa de confiabilidade encontra-se abaixo de 90% para todas as possíveis alturas de torre e para todos os *links*. Em relação aos links PL_CAR, CAR-PS e PS_PL percebe-se que estes atingem uma confiabilidade acima do esperado, mas apenas para as frequências de 4 e 5 GHz. Para a frequência de 8GHz a confiabilidade do sistema cai vertiginosamente indicando que possivelmente todos os trechos estão indisponíveis para operarem nesta faixa de frequência.

O GRÁFICO 29 demonstra graficamente os resultados obtidos.

GRÁFICO 29 – RESULTADOS REFERENTES A CONFIABILIDADE DE TODOS OS *LINKS*.



FONTE: O autor (2024)

4.6.6 Determinação da porcentagem de tempo total de indisponibilidade (TTI) [%]

A determinação da porcentagem do tempo total de indisponibilidade do sistema representa um dos cálculos mais importantes no projeto de concepção de um enlace, pois ele envolve a determinação de IS que representa a inoperância do sistema, de PI que representa a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento não seletivo, de PS que representa a probabilidade de inoperância em razão do desvanecimento seletivo e de PI_{μ} que representa a probabilidade do período de inoperância total.

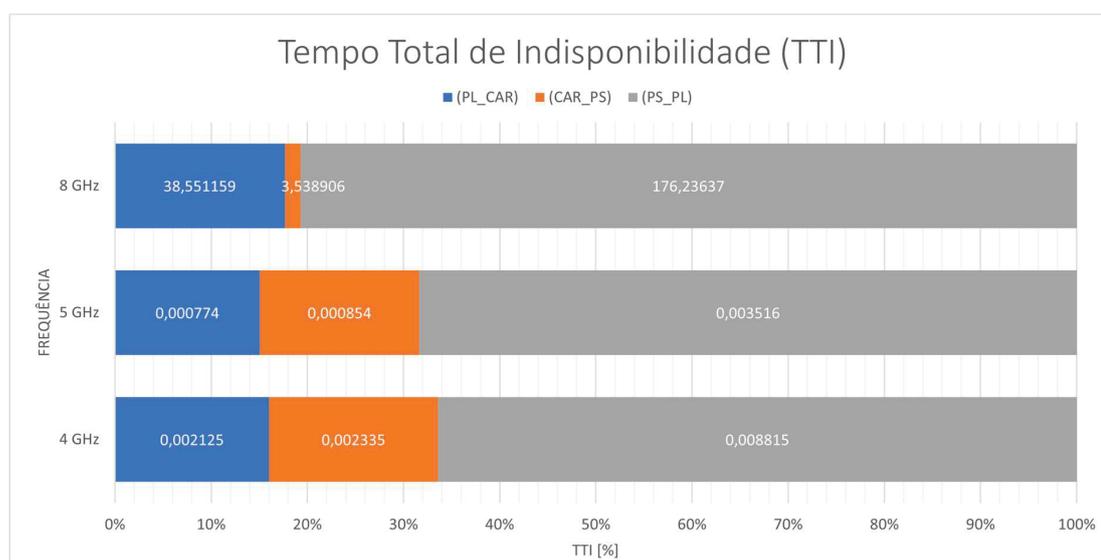
Os resultados obtidos são oriundos da EXPRESSÃO (2.47) e encontram-se no QUADRO 49 e no GRÁFICO 30 .

QUADRO 49 - VALORES DA DETERMINAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE INDISPONIBILIDADE (TTI)[%]

Tempo total de indisponibilidade (TTI)[%]	Frequência [GHz]	Link 1 (PS-CAR)	Link 2 (CAR-PL)	Link 3 (PL-PS)
	4	0,002125	0,002335	0,008815
	5	0,000774	0,000854	0,003516
	8	38,551159	3,538906	176,236370

FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 30 – RESULTADOS REFERENTES AO TEMPO TOTAL DE INDISPONIBILIDADE TODOS OS LINKS.



FONTE: O autor (2024)

Destaca-se que os valores obtidos para 4 e 5 GHz são excelentes o que comprova a viabilidade do *link* e que para a frequência de 8 GHz ela encontra-se completamente degradada.

4.6.7 Resultados referentes à disponibilidade do sistema

As condições de disponibilidade dos enlaces para as frequências de 4 GHz, 5 GHz e 8 GHz explorando todas as possíveis combinações foram obtidas da Equação (2.48) e EQUAÇÃO (2.49) e encontram-se apresentadas no QUADRO 49, no QUADRO 50 e no QUADRO 51, QUADRO 52, QUADRO 53 e QUADRO 54.

QUADRO 49– PARA A FREQUÊNCIA DE 4 GHZ:

Dados relativos a frequência 4 GHz - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,6929	6,116055	5,236934	4,273561	4,111022	2,727169
Polarização Vertical	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591
Polarização Horizontal	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650
índice α - Vertical	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
índice α - Horizontal	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121
Yr - atenuação unitária vertical	0,008545	0,027006	0,052537	0,079002	0,083481	0,124468
Yr - atenuação unitária horizontal	0,010536	0,03498	0,070015	0,107138	0,113478	0,17211
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,05719	0,16517	0,275135	0,337622	0,343192	0,339446
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,070516	0,213937	0,366662	0,457859	0,466512	0,469374
Bw - Largura de banda	29					
Modulação possível	4 PSK ou QPSK ou 4 QAM e 64 QAM					
Potência máxima transmitida	35					
Potência recebida – vertical	-49,10465494					
Potência recebida – horizontal	-49,19250578					
Potência recebida – média	-49,14858036					
Limiar de recepção	-72					
Dados relativos a frequência 4 GHz - CAR/OS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,9388	6,320746	5,38629	4,372503	4,2025	2,767127
Polarização Vertical	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591
Polarização Horizontal	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650
índice α - Vertical	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
índice α - Horizontal	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121
Yr - atenuação unitária vertical	0,008545	0,027006	0,052537	0,079002	0,083481	0,124468
Yr - atenuação unitária horizontal	0,010536	0,03498	0,070015	0,107138	0,113478	0,17211
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,059291	0,170698	0,282982	0,345438	0,350829	0,344419
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,073107	0,221097	0,37712	0,468459	0,476893	0,476251
Bw - Largura de banda	29					
Modulação possível	4 PSK ou QPSK ou 4 QAM e 64 QAM					
Potência máxima transmitida	35					
Potência recebida – vertical	-49,51931016					
Potência recebida – horizontal	-49,60918825					
Potência recebida – média	-49,5642492					
Limiar de recepção	-72					
Dados relativos a frequência 4 GHz – PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d_{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	10,98384	9,511593	7,54249	5,693864	5,408935	3,243475
Polarização Vertical	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591	0,000591
Polarização Horizontal	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650	0,000650
índice α - Vertical	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
índice α - Horizontal	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121	1,121
Yr - atenuação unitária vertical	0,008545	0,027006	0,052537	0,079002	0,083481	0,124468
Yr - atenuação unitária horizontal	0,010536	0,03498	0,070015	0,107138	0,113478	0,17211
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,093856	0,25687	0,396264	0,449829	0,451543	0,403709
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,115726	0,332711	0,528085	0,610026	0,613798	0,558235
Bw - Largura de banda	29					
Modulação possível	4 PSK ou QPSK ou 4 QAM e 64 QAM					

Potência máxima transmitida	35
Potência recebida – vertical	-55,33061907
Potência recebida – horizontal	-55,44837073
Potência recebida – média	-55,3894949
Limiar de recepção	-72

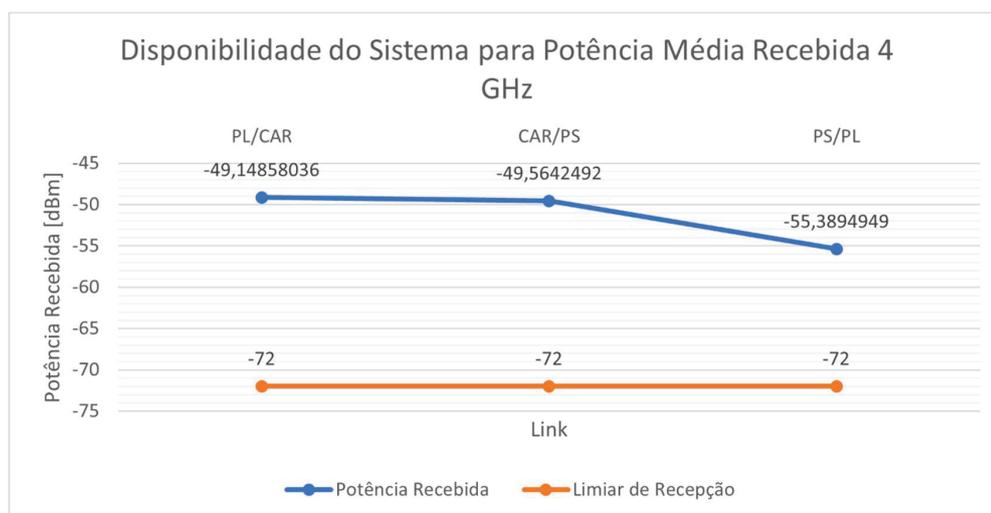
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 50 – VIABILIDADE DO ENLACE DE 4 GHZ.

Viabilidade do enlace para a frequência 4 GHz			
PL/CAR			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-49,10465494	-72	Disponível
Potência recebida – horizontal	-49,19250578	-72	Disponível
Potência recebida – média	-49,14858036	-72	Disponível
CAR/PS			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-49,51931016	-72	Disponível
Potência recebida – horizontal	-49,60918825	-72	Disponível
Potência recebida – média	-49,5642492	-72	Disponível
PS/PL			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-55,33061907	-72	Disponível
Potência recebida – horizontal	-55,44837073	-72	Disponível
Potência recebida – média	-55,3894949	-72	Disponível

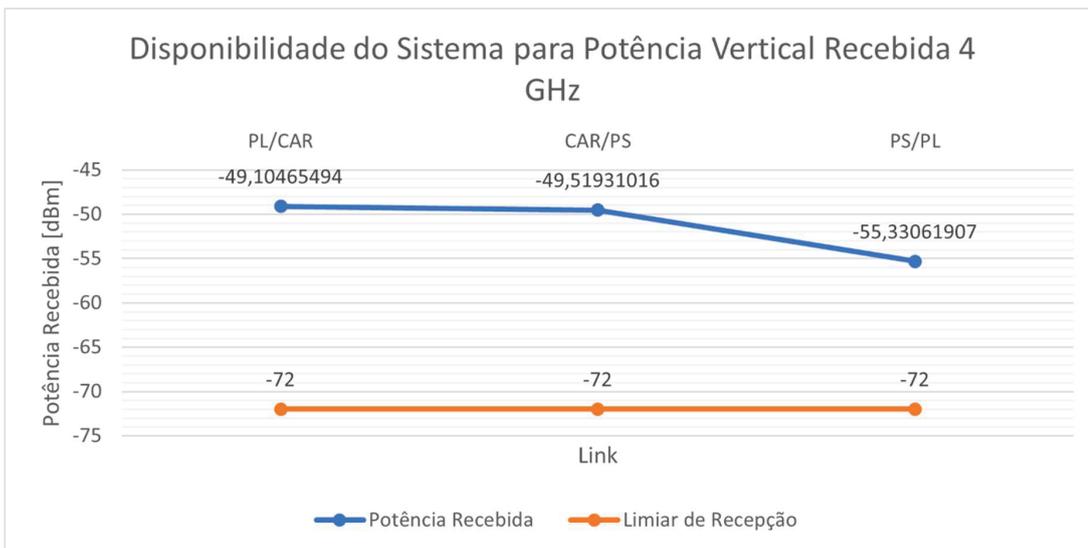
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 31 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA MÉDIA RECEBIDA PARA 4 GHZ.



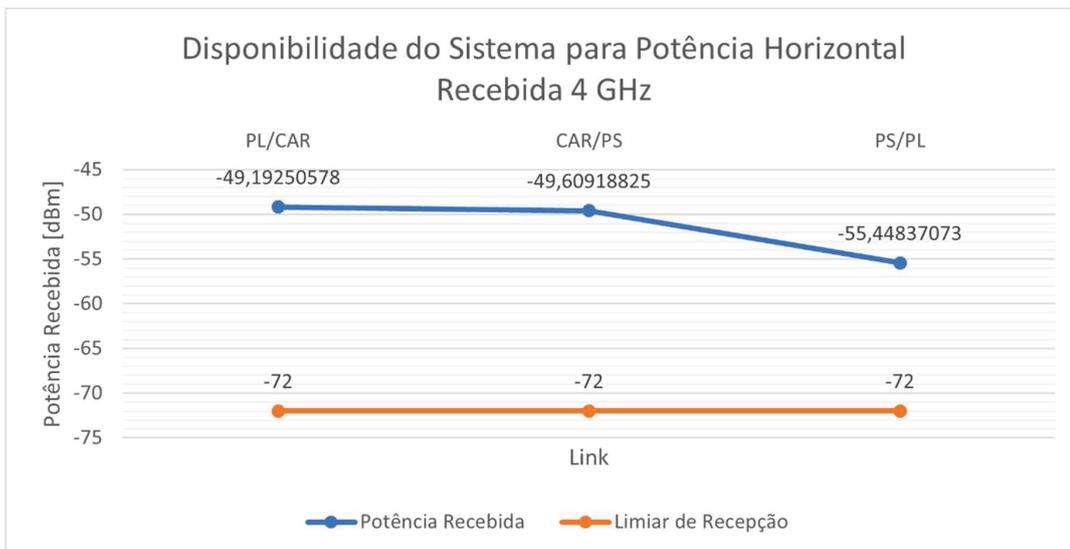
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 32 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA VERTICAL RECEBIDA PARA 4 GHz.



FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 33 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA HORIZONTAL RECEBIDA PARA 4 GHz.



FONTE: O autor (2024)

QUADRO 51 – PARA FREQUÊNCIA DE 5 GHz.

Dados relativos a frequência 5 GHz - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d _{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,6929	6,116055	5,236934	4,273561	4,111022	2,727169
Polarização Vertical	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
Polarização Horizontal	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175
índice α - Vertical	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265
índice α - Horizontal	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Yr - atenuação unitária vertical	0,035933	0,13918	0,304556	0,492212	0,525208	0,840354
Yr - atenuação unitária horizontal	0,045145	0,183096	0,411461	0,675928	0,722833	1,175188
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,240497	0,851234	1,594939	2,103498	2,159144	2,291787
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,302149	1,119826	2,154794	2,88862	2,971583	3,204937
Bw - Largura de banda	40					
Modulação possível	8 PSK ou 64 QAM					
Potência máxima transmitida	37					
Potência recebida – vertical	-50,33007924					
Potência recebida – horizontal	-50,89688091					
Potência recebida – média	-50,61348007					
Limiar de recepção	-78					
Dados relativos a frequência 5 GHz - CAR/OS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d _{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,9388	6,320746	5,38629	4,372503	4,2025	2,767127
Polarização Vertical	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
Polarização Horizontal	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175
índice α - Vertical	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265
índice α - Horizontal	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Yr - atenuação unitária vertical	0,035933	0,13918	0,304556	0,492212	0,525208	0,840354
Yr - atenuação unitária horizontal	0,045145	0,183096	0,411461	0,675928	0,722833	1,175188
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,249333	0,879723	1,640427	2,152198	2,207188	2,325366
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,31325	1,157304	2,216249	2,955498	3,037706	3,251895
Bw - Largura de banda	40					
Modulação possível	8 PSK ou 64 QAM					
Potência máxima transmitida	37					
Potência recebida – vertical	-50,77427337					
Potência recebida – horizontal	-51,35388435					
Potência recebida – média	-51,06407886					
Limiar de recepção	-78					
Dados relativos a frequência 5 GHz - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d _{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	10,98384	9,511593	7,54249	5,693864	5,408935	3,243475
Polarização Vertical	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155	0,00155
Polarização Horizontal	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175	0,00175
índice α - Vertical	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265	1,265
índice α - Horizontal	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Yr - atenuação unitária vertical	0,035933	0,13918	0,304556	0,492212	0,525208	0,840354
Yr - atenuação unitária horizontal	0,045145	0,183096	0,411461	0,675928	0,722833	1,175188
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	0,394685	1,323826	2,29711	2,802588	2,840818	2,725667
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,495863	1,741535	3,103441	3,848643	3,909757	3,811693
Bw - Largura de banda	40					
Modulação possível	8 PSK ou 64 QAM					

Potência máxima transmitida	37
Potência recebida – vertical	-56,99092309
Potência recebida – horizontal	-57,74529619
Potência recebida – média	-57,36810964
Limiar de recepção	-78

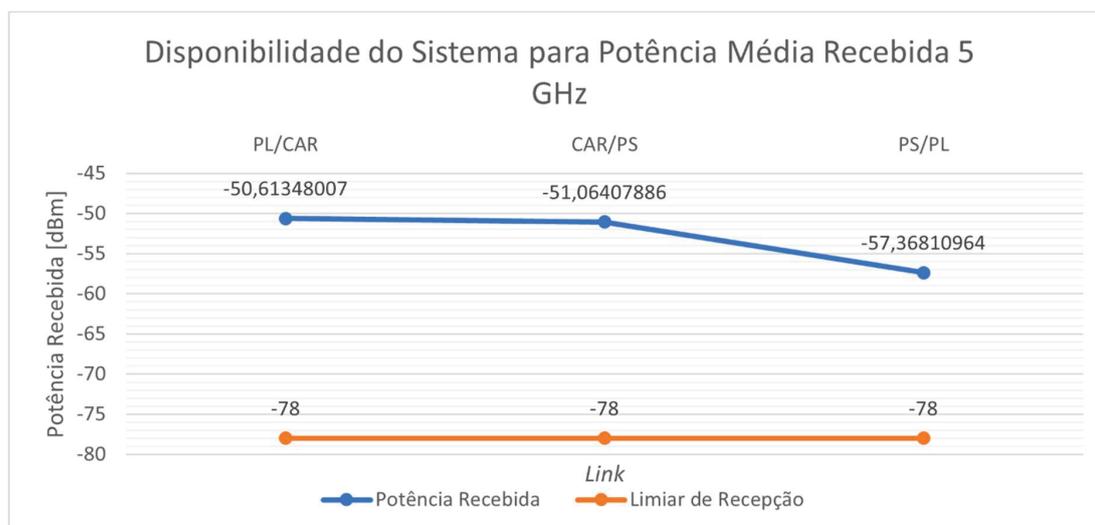
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 52 – VIABILIDADE DO ENLACE DE 5 GHz:

Viabilidade do enlace para a frequência 5 GHz			
PL/CAR			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-50,33007924	-78	Disponível
Potência recebida – horizontal	-50,89688091	-78	Disponível
Potência recebida – média	-50,61348007	-78	Disponível
CAR/OS			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-50,77427337	-78	Disponível
Potência recebida – horizontal	-51,35388435	-78	Disponível
Potência recebida – média	-51,06407886	-78	Disponível
PS/PL			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-56,99092309	-78	Disponível
Potência recebida – horizontal	-57,74529619	-78	Disponível
Potência recebida – média	-57,36810964	-78	Disponível

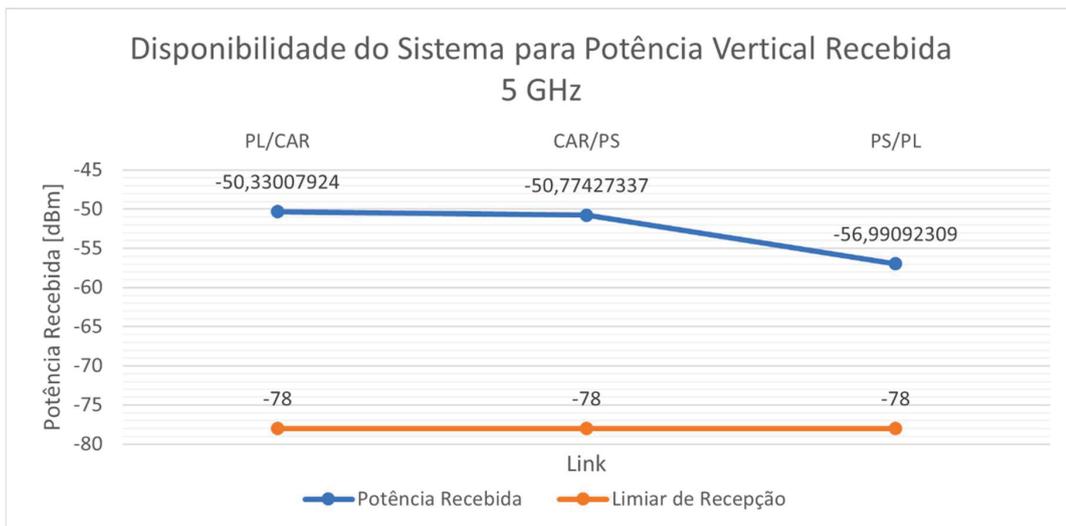
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 34 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA MÉDIA RECEBIDA PARA 5 GHz.



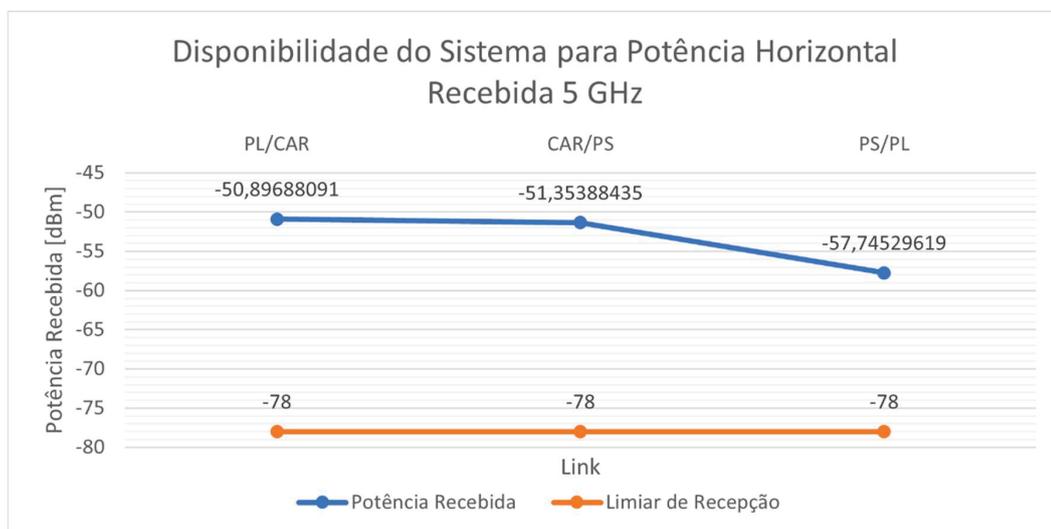
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 35 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA VERTICAL RECEBIDA PARA 5 GHz.



FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 36 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA HORIZONTAL RECEBIDA PARA 5 GHz.



FONTE: O autor (2024)

QUADRO 51 – PARA FREQUÊNCIA DE 8 GHZ.

Dados relativos a frequência 8 GHz - PL/CAR						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d _{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,6929	6,116055	5,236934	4,273561	4,111022	2,727169
Polarização Vertical	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395
Polarização Horizontal	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454
índice α - Vertical	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310
índice α - Horizontal	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
Yr - atenuação unitária vertical	1,398682	5,684871	12,7911	21,02855	22,4901	36,59178
Yr - atenuação unitária horizontal	0,12278	0,508199	1,155558	1,912032	2,046708	3,351129
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	9,361237	34,76898	66,98615	89,86681	92,45731	99,79198
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,821758	3,108175	6,051582	8,171185	8,414061	9,139097
Bw - Largura de banda	29,65					
Modulação possível	4 PSK ou QPSK ou 4 QAM					
Potência máxima transmitida	37					
Potência recebida – vertical	-127,6110405					
Potência recebida – horizontal	-68,02327207					
Potência recebida – média	-97,8171563					
Limiar de recepção	-78					
Dados relativos a frequência 8 GHz - CAR/PS						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d _{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	6,9388	6,320746	5,38629	4,372503	4,2025	2,767127
Polarização Vertical	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395
Polarização Horizontal	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454
índice α - Vertical	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310
índice α - Horizontal	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
Yr - atenuação unitária vertical	1,398682	5,684871	12,7911	21,02855	22,4901	36,59178
Yr - atenuação unitária horizontal	0,12278	0,508199	1,155558	1,912032	2,046708	3,351129
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	9,705172	35,93262	68,89659	91,94741	94,51466	101,2541
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	0,851949	3,212199	6,224173	8,360364	8,60129	9,273
Bw - Largura de banda	29,65					
Modulação possível	4 PSK ou QPSK ou 4 QAM					
Potência máxima transmitida	37					
Potência recebida – vertical	-117,922725					
Potência recebida – horizontal	-56,96812966					
Potência recebida – média	-87,44542733					
Limiar de recepção	-78					
Dados relativos a frequência 8 GHz - PS/PL						
Índices Pluviométricos [mm/h]	12	35	65	95	100	145
d _{eff} - diâmetro efetivo da gota de chuva	10,98384	9,511593	7,54249	5,693864	5,408935	3,243475
Polarização Vertical	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395	0,05395
Polarização Horizontal	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454	0,00454
índice α - Vertical	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310	1,310
índice α - Horizontal	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327	1,327
Yr - atenuação unitária vertical	1,398682	5,684871	12,7911	21,02855	22,4901	36,59178
Yr - atenuação unitária horizontal	0,12278	0,508199	1,155558	1,912032	2,046708	3,351129
Aac - Atenuação chuva com polarização vertical	15,3629	54,07217	96,47675	119,7337	121,6475	118,6845
Aac - Atenuação chuva com polarização horizontal	1,348601	4,833786	8,715787	10,88685	11,07051	10,8693
Bw - Largura de banda	29,65					
Modulação possível	4 PSK ou QPSK ou 4 QAM					

Potência máxima transmitida	37
Potência recebida – vertical	-144,272135
Potência recebida – horizontal	-64,56334648
Potência recebida – média	-104,4177407
Limiar de recepção	-78

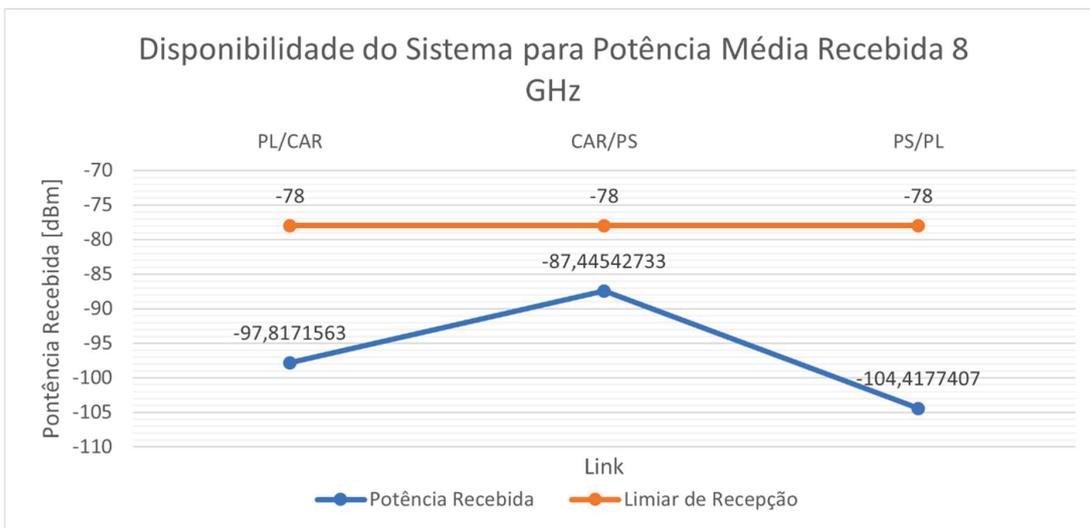
FONTE: O autor (2024)

QUADRO 54 – VIABILIDADE DO ENLACE DE 8 GHZ.

Viabilidade do enlace para a frequência 8 GHz			
PL/CAR			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-127,6110405	-78	Indisponível
Potência recebida – horizontal	-68,02327207	-78	Disponível
Potência recebida – média	-97,8171563	-78	Indisponível
CAR/PS			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-117,922725	-78	Indisponível
Potência recebida – horizontal	-56,96812966	-78	Disponível
Potência recebida – média	-87,44542733	-78	Indisponível
PS/PL			
Polarização		Limiar de recepção	Disponibilidade
Potência recebida – vertical	-144,272135	-78	Indisponível
Potência recebida – horizontal	-64,56334648	-78	Disponível
Potência recebida – média	-104,4177407	-78	Indisponível

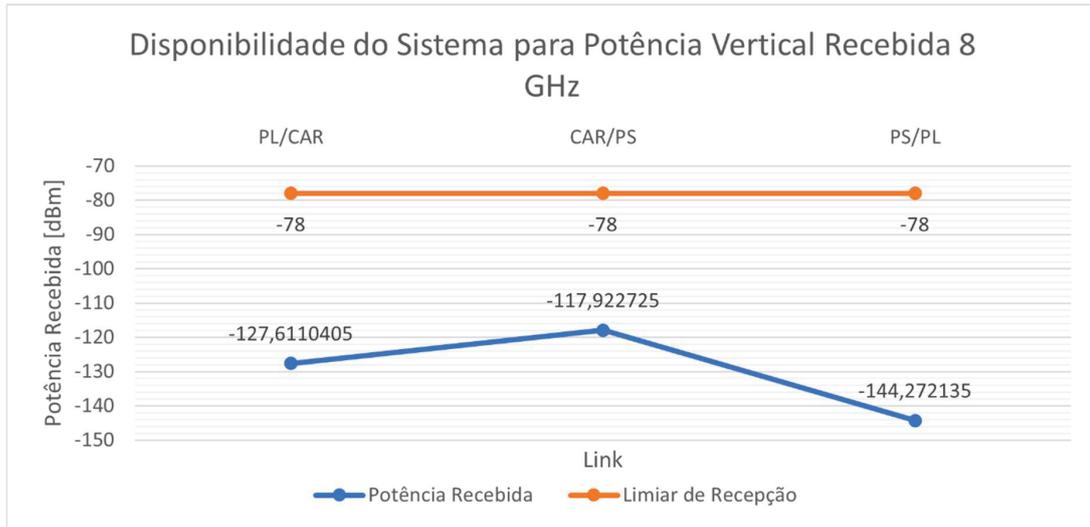
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 37 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA MÉDIA RECEBIDA PARA 8 GHZ.



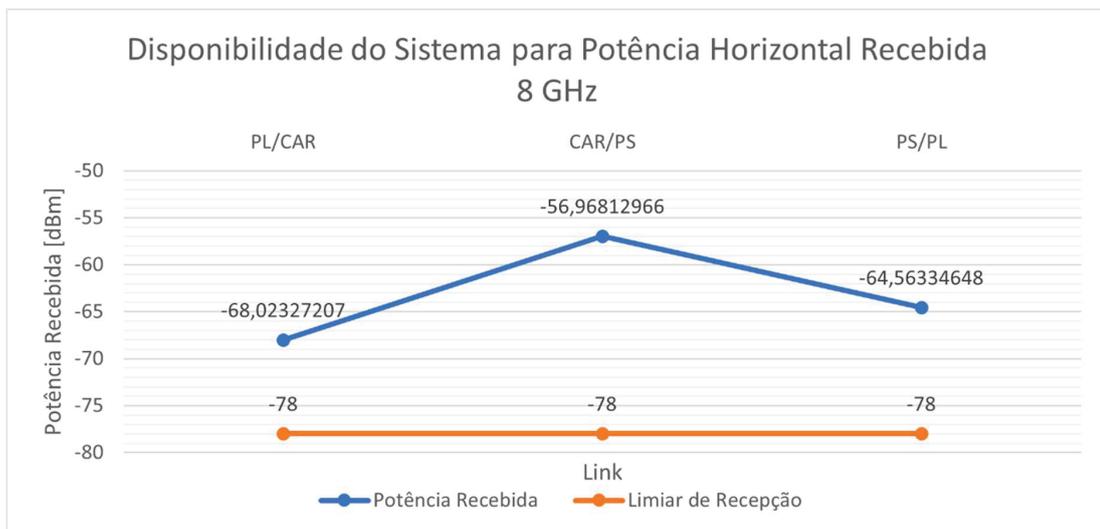
FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 38 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA VERTICAL RECEBIDA PARA 8 GHz.



FONTE: O autor (2024)

GRÁFICO 39 – DISPONIBILIDADE DO SISTEMA PARA POTÊNCIA HORIZONTAL RECEBIDA PARA 8 GHz.



FONTE: O autor (2024)

Após a análise dos resultados obtidos percebe-se que o uso da polarização vertical para as frequências de 4 e 5 GHz melhoram não somente o nível do sinal recebido, ao mesmo tempo em que melhoram as condições do sistema de modo geral. A frequência de 8 GHz, não pode ser utilizada no *link*, pois mesmo que esta torne o sistema disponível, o mesmo afetará através de interferências co-canal ou adjacente os blocos de 4 e 5 GHz.

De um modo geral foi projetado um sistema estável, onde uma completa análise da interferência e da degradação do sinal rádio elétrico devido as chuvas em um sistema ponto-multiponto no município de Pontal do Paraná - PR foram propostas, realizadas e analisadas, cumprindo com os objetivos dessa dissertação. A seguir será realizada um balanço de todos os resultados obtidos dentro da proposta apresentada.

4.7 ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este estudo propôs a realização de uma análise da degradação do sinal rádio elétrico em um sistema de transmissão ponto-multiponto real operando em região costeira no município de Pontal do Paraná - PR. Para tal, foram realizadas massivas campanhas de medidas no local para distintas frequências, bem como a aplicação de vários modelos de propagação existentes na literatura, de modo a estimar a atenuação por chuvas e vegetação em ambientes marinhos considerando as características específicas do canal de propagação neste tipo de cenário.

Como nenhum dos modelos utilizados contemplava todas as variáveis que pudessem ser aplicadas a um sistema real, foi necessário o desenvolvimento de um modelo que incluísse não apenas os parâmetros de vegetação costeira, análise feita por metro quadrado, mas também que tivesse associação com as condições marinhas dentro do cenário proposto. Foram então incluídos os parâmetros correlacionados ao fator climático tal como o diâmetro da gota de chuva, a área de assinatura, o tempo médio de chuva na região bem como a densidade da vegetação no local.

Para tanto utilizou-se métricas simples para determinar facilmente os parâmetros do modelo que não só pudessem ser aplicados como também garantissem a comunicação eficiente para o sistema proposto uma vez que este modelo foi composto de diversos outros parâmetros e os erros introduzidos na estimativa da atenuação foram os menores possíveis. Dos resultados obtidos para os três enlaces, destaca-se que o sistema é performante com uma confiabilidade acima

de 99% e uma excelente taxa de disponibilidade dentro das faixas de frequência escolhidas para projeto que foram 4, 5 e 8 GHz. Finalmente destaca-se que as degradações sofridas em 8 GHz não são devidas ao modelo e sim as condições atmosféricas presentes dentro do cenário real de medições, sendo este justamente o propósito desse trabalho, ou seja, avaliar estas possíveis degradações dentro de um cenário real. Os resultados obtidos fornecem bons indicativos sobre como as chuvas impactam a qualidade e a confiabilidade das comunicações em ambientes costeiros.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sob uma perspectiva científica, a integração de conhecimentos e fórmulas visando criar ferramentas ou tecnologias inovadoras tem sido alvo de diversos estudos ao longo da história. Vale destacar o trabalho relacionado às equações de Maxwell, as quais nada mais são do que a síntese das leis propostas por Carl Friedrich Gauss, André-Marie Ampère e Michael Faraday, equações essas que desempenharam um papel crucial no avanço tecnológico do mundo moderno. Esta abordagem para o desenvolvimento científico exige um árduo processo de adequação das equações e das leis da física as quais teve por base a pesquisa e o desenvolvimento do trabalho, ora apresentado.

A união dos modelos de Weissberger, LEE e Epstein-Peterson, com os equacionamentos de Tertuliano relacionados à estruturação de um enlace, aliada à integração das equações de atenuação, especialmente aquelas causadas pela chuva, da análise da potência, dos diversos tipos de ruído enfrentados pelo sistema, e dos efeitos de difração resultantes da topografia e morfologia no percurso do sinal, fizeram com que fossem realizadas diversas tentativas de ajuste no enlace. O produto final desta dissertação, apresentado de maneira consistente e com resultados positivos, testou de forma coerente e abrangente todos esses parâmetros.

Apesar da conclusão bem-sucedida da proposta desta dissertação e do fato que não só o modelo desenvolvido como também os modelos escolhidos se mostraram viáveis, é imperativo realizar testes mais exaustivos em áreas mais abrangentes do município, incluindo regiões com maior densidade populacional. Dado que o foco desta dissertação era apresentar uma análise da interferência e da degradação do sinal radioelétrico devido as chuvas em um sistema ponto-multiponto em regiões costeiras tendo Pontal do Paraná como caso real, foram conduzidos poucos testes fora dessa área específica de estudo. Como a formulação das hipóteses e levantamento dos dados foi criada especificamente para a área descrita acima, é possível que tenha existido certa exclusividade dos modelos com a área analisada o que pode explicar a aparente promissora apresentação dos dados.

Entretanto, mesmo sendo este um estudo desafiador, com diversos fatores e dificuldades este trabalho revelou diversas possibilidades de aprimorar a qualidade de

vida para os habitantes de uma determinada região. Além disso, sugere-se que este estudo seja expandido para outras localidades, destacando seu potencial para contribuir cientificamente e qualitativamente para a sociedade de Pontal do Paraná. Propõem-se a realização de testes através de sistemas *hotspots*, utilizando redes alternativas de telecomunicação visando a melhoria da mobilidade urbana e da qualidade de vida dos cidadãos locais.

5.2 CONTRIBUIÇÕES

Ao se cumprir o objetivo principal desta dissertação de realizar a análise das interferências bem como da degradação de sinal radioelétrico dentro de um sistema de transmissão ponto-multiponto em uma região marinha com a utilização de três distintas frequências (4, 5 e 8 GHz) de modo a compreender e mitigar os efeitos adversos das interferências e degradações que podem ocorrer entre os dispositivos que operam no mesmo canal de frequência em uma área geográfica limitada na região costeira de Pontal do Paraná, outros produtos desta pesquisa foram gerados. Tal como a criação de um cenário para a realização de testes e medições utilizando-se equipamentos e programas computacionais específicos de modo a se compreender a magnitude e os padrões de interferência. Isso envolveu examinar diversas métricas como os efeitos da chuva sobre o *link*, a qualidade do sinal, a taxa de erro de bits, a confiabilidade de conexão e a qualidade de voz. Para os testes dos modelos de propagação propostos nessa dissertação, foi gerado não só um fluxograma abrangente e norteador para trabalhos futuros bem como uma ferramenta de projetos de rádio enlace desenvolvida sobre o Excell e Matlab que continua em desenvolvimento através de mestrandos e graduandos do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Para a validação de soluções foi fundamental realizar testes em campo, ou seja, medições nas regiões de abrangência do cenário e também em laboratório tanto para monitorar o desempenho quanto para validar as soluções propostas o que também serviu para avaliação de métricas de desempenho bem como a comparação de diferentes abordagens de mitigação. Os resultados desses testes foram usados para aprimorar os algoritmos e desenvolver melhores práticas para o gerenciamento de interferências. Para a avaliação e quantificação do impacto da interferência e da degradação de sinal foram realizados testes e medições de sinal dentro do cenário e, a análise de resultados foi realizada

utilizando-se planilhas desenvolvidas para tal fim, o que possibilitou a compreensão dos padrões de interferência pois as métricas utilizadas levou em consideração todos os fatores já mencionados.

A base de dados utilizada neste projeto utilizou técnicas de reconhecimento de imagens através de lógica Fuzzy - FIP para detecção de objetos em imagens complexas pertencente ao LabTelecom, que é um software não patentado, desenvolvido pelo grupo de pesquisa do próprio laboratório. Conjuntamente com a identificação dos dados, todo o processo de medição em escala e georreferenciamento das imagens foi desenvolvida neste projeto, o qual continuará seu desenvolvimento pela equipe de pesquisa do LabTelecom.

Finalmente, vale ressaltar que a rede proposta precisou coexistir harmoniosamente com outras tecnologias de comunicação existentes no local de estudo, tais como redes *Wi-Fi*, redes celulares legadas (3G, 4G) e dispositivos de comunicação de curto alcance (*near-field*).

5.3 PRÓXIMOS PASSOS DO PROJETO

Os próximos passos desta dissertação serão orientados para consolidar e expandir as conquistas já alcançadas. A seguir, delineia-se as principais etapas a serem seguidas:

- Desenvolvimento de Ferramentas Complementares: Ampliar as capacidades do programa existente, integrando ferramentas para simulação de transmissão de pacotes, perdas, erros de transmissão, interferência co-canal e canal adjacente, entre outras variáveis relevantes para projetos de RF.
- Criação de Programa Independente do Matlab: Transformar o programa em uma ferramenta independente do Matlab, visando maior acessibilidade e liberdade de uso. Isso inclui a reprogramação e compilação do *software*, assegurando sua operação eficiente sem depender de licenças de *software* pagas.
- Uso Acadêmico Amplo: Adaptar o programa para um uso acadêmico mais abrangente, tornando-o uma ferramenta completa para projetos de RF e simulações, sendo útil tanto para aulas quanto para estudos individuais.
- Continuidade do Projeto de Base de Dados: Aprimorar e dar continuidade ao projeto de criação automática de base de dados utilizando imagens

de satélite do Google Maps API em conjunto com inteligência artificial. Isso permitirá a obtenção de dados necessários para simulações sem depender de bases de dados financeiramente onerosas.

- **Melhoria da Interface do Usuário:** Aprimorar a interface do usuário para atender às novas ferramentas integradas, proporcionando uma experiência mais intuitiva e adaptada às necessidades de alunos e professores. Incluir recursos que facilitem a compreensão e utilização eficiente das funcionalidades oferecidas.

- **Manutenção da Gratuidade:** Comprometer-se a manter o *software* gratuito, alinhado ao objetivo principal do projeto. Garantir que a qualidade e funcionalidades do programa não sejam comprometidas ao manter sua acessibilidade para a comunidade acadêmica.

Esses passos não apenas consolidarão os resultados atuais, mas também abrirão caminho para a evolução contínua do projeto, contribuindo significativamente para o desenvolvimento e disseminação do conhecimento em radiofrequência.

5.4 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros propõem-se:

- Estudo das interferências produzidas pelas diferentes tecnologias presentes no local de testes e o desenvolvimento de soluções que empreguem o uso de técnicas avançadas de processamento de sinal, como filtragem adaptativa e cancelamento de interferência que permitiriam a coexistência eficiente e sem degradação significativa do desempenho. Esse teria sido um desafio importante, mas que infelizmente não foi considerado no escopo desse trabalho;

- Colaboração interdisciplinar que poderia ser criada para melhora da interface com o usuário através de pesquisadores de ciência da computação ou áreas afins e ainda, em conjunto com pesquisadores das áreas de inteligência artificial e de sistemas corretores de erros visando a inclusão de novas ferramentas e melhoria das já existentes.

- O ambiente interno não foi analisado nessa dissertação, mas este poderia ser feito através de técnicas FETD (Finite Element Time Domain) e FDTD (Finite Difference Time Domain) que são métodos numéricos utilizados na simulação

de campos eletromagnéticos ao longo do tempo. Ambas essas técnicas são amplamente empregadas em análises eletromagnéticas em diferentes contextos, como comunicações sem fio, antenas, dispositivos eletrônicos, entre outros. Tendo por base dissertações nessa área específica do conhecimento, tais técnicas talvez possam trazer contribuições significativas para a compreensão do sinal *indoor*.

REFERÊNCIAS

3GPP RP-172290. **New SID Proposal: Study on Integrated Access and Backhaul for NR**. Disponível em: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_78/Docs. Acesso em: 03 mar. 2023.

3GPP TS 37.141, E-UTRA, UTRA and GSM/EDGE; **Multi-Standard Radio (MSR) Base Station**. Retrieved from: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/137100_137199/137141/16.06.00_60/ts_137141v160600p.pdf.

3GPP TS 37.141. **E-UTRA, UTRA and GSM/EDGE; Multi-Standard Radio (MSR) Base Station**. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/137100_137199/137141/16.06.00_60/ts_137141v160600p.pdf. Acesso em: 04 mar. 2023.

3GPP. 5G; **Study on New Radio (NR) access technology**. TR 38.912 v15.0.0 Release 15. [S.l.], 2018. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138912/15.00.00_60/tr_138912v150000p.pdf. Acesso em: 05 mar. 2023.

3GPP. **Service requirements for next generation new services and markets**. TS 22.261 v15.6.0 Release 15. [S.l.], 2019. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122261/15.06.00_60/ts_122261v150600p.pdf. Acesso em: 05 mar. 2023.

ABDULRASOOL, A. S. **Calculation Algorithm for Diffraction Losses of Multiple Obstacles Based on Epstein–Peterson Approach**. Special Issue - International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2017, Article ID 3932487, 2017.

ADEWUMI A. S., OLABISI O. **Characterization and modeling of vegetation effects on UHF propagation through a long forest channel**. Progress in Electromagnetics Research Letters, vol. 73, pp 9 – 16, 2018.

ANASTASSIU, H.T, VOUGIOUKAS S, FRONIMOS. **Computational model for path loss in wireless sensor networks in orchard environments**. Sensors 2014; 14:5118–35.

ANATEL Agência Nacional De Telecomunicações **Resolução nº 715 de 23 de fevereiro, 2019: “Procedimento Operacional para Homologação de Produto para Telecomunicações por Declaração de Conformidade com Relatórios de Ensaios”**. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-divulga-novo-procedimento-para-homologacao-de-produtos-de-telecomunicacoes>.

ANATEL. Agência Nacional De Telecomunicações. **Ato nº 915, de 01 de fevereiro de 2024: Requisitos Técnicos e Operacionais para uso das Faixas de Radiofrequências Associadas ao Serviços Limitado Privado**. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2024/1920-ato-915>. Acesso em: 03 mar 2024.

ANATEL. Agência Nacional De Telecomunicações. **Resolução nº 369 de 19 de fevereiro de 2004: “Aprova a Norma para Certificação e Homologação de Transmissores e Transceptores Digitais para o Serviço Fixo em Aplicações Ponto-a-Ponto nas Faixas de Frequências acima de 1 GHz.** Disponível em: <http://www.anatel.gov.br> > Radiofrequência > Legislação. Acesso em: 25 mar 2023.

AZEVEDO, J. A.; SANTOS, F. E. **A model to estimate the path loss in areas with foliage of trees.** AEU-International Journal of Electronics and Communications, 71, 157-161. (2017)

AZPILICUETA L., LOPEZ-ITURRI P., AGUIRRE E. **Analysis of Radio Wave Propagation for ISM 2.4 GHz Wireless Sensor Networks in Inhomogeneous Vegetation Environments.** Sensors, vol. 14, no. 12, pp. 23650-23672, 2014.

BARTZOU DIS, R., BALTAR, N. **The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance.** Journal on Wireless Communications and Networking, v. 13, 2017.

BERTONI, H. **Radio Propagation for Modern Wireless Systems.** New Jersey: Prantice Hall, 2000.

BLAUNSTEIN N., CHRISTODOULOU, C. **Radio propagation and adaptive antennas for wireless communication links: terrestrial, atmospheric and ionospheric.** Wiley – Interscience, 2007.

BOSCO, L. **Communication concepts: Circuit designer perspective.** In: **VLSI for Wireless Communication.** 1a. ed. Springer US: Prentice Hall, 2002. p. 15–38.

BUDDEN, K.G.: **The propagation of radio waves.** CUP – 2005.

CÂNDIDO, D. H.; NUNES, L. H. **INFLUÊNCIA DA OROGRAFIA NA PRECIPITAÇÃO DA ÁREA ENTRE O VALE DO RIO TIETÊ E A SERRA DA MANTIQUEIRA.** GEOUSP Espaço e Tempo (Online), v. 12, n. 1, p. 08-27, 2008. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2008.74094.

CASCIATO M. D., OVEISGHARAN S. **Radio Wave Propagation in the Presence of a Coastline.** Radio Sci., 38 (5), 1085, doi: 10.1029/2002RS002696, 2003.

CASTELLANOS, G. D.; TEUTA, G. **Urban-vegetation ratio evaluation for path loss model in Amazonian region for television bands.** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8230943>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

CASTELLANOS, G.; TEUTA, G. **Path loss model in amazonian border region for VHF and UHF television bands.** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8062262>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

CHAPMAN, T., LARSSON, E., VON WRYCZA, P., DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKOLD, J. **HSPA evolution: The fundamentals for mobile broadband.** 2014. 1-536., Academic Press, 2014.

COLOMBI, D., THORS, B. and TÖRNEVIK, C. **Implications of EMF Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices Above 6 GHz**. 2015. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume 14, pp. 1247 a 1249, 2015.

ETSI EN 301 216. **Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH); Low and medium capacity and STM-0 digital radio system operating in the frequency bands in the range 3 GHz to 11 GHz**. Disponível em: <http://www.etsi.org>. Acesso em: 27 mar 2023.

ETSI EN 301 461. **Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; High capacity fixed radio systems carrying SDH signals (2 x STM-1) in frequency bands with 40 MHz channel spacing and using Co-channel Dual Polarized (CCDP) operation**. Disponível em: <http://www.etsi.org>. Acesso em: 27 mar 2023.

FERNANDO, F. **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações**. Disponível em: http://www.maenatureza.org.br/projetoeducando/folders/poster13_ciclo_hidrologico/img1.jpg. Acesso em: 17 set 2023

GOMES, G. G. R. **Sistemas de rádio enlaces digitais: Terrestres e por satélites**. 1ª edição - Editora Érica, 2013.

GOSLING, W. **Radio Antennas and Propagation**. Newnes – British Library Cataloging in Publication Data. 2004.

GUANRONG, C., XINCHU, F., SMALL, M. **Integrated Wireless Propagation Models**. McGraw-Hill Education, 2014.

GUINOT, V. **Wave Propagation in Fluids: Models and Numerical Techniques, Second Edition**. ISTE – Willey 2010.

HAGARTY, D., AJMERI, S., and TANWAR, A. **Synchronizing 5G Mobile Networks**. Cisco Press. 2021.

HALL, M. P. M.; BARCLAY, L. W.; HEWITT, M. T. **Propagation of Radiowaves**. 1 a. ed. British Library, 1996. p. 9–22, 38–58 e 60–102.

HIPP, J. E. **Soil electromagnetic parameters as functions of frequency, soil density and soil moisture**". Proceedings IEEE, 62 - pp. 98 – 103 – 2004.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). **Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems**. 2012. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-14-201202-S!!PDF-E.pdf. Acesso em: 26 set. 2023.

JAKES, W. C. **Microwaves Mobile Communications**. pp. 45 -54, ed. Wiley-Interscience, 1974.

KITAO, K.; IMAI, T.; TRAN, N.; OMAKI, N. **Path loss prediction model for 800 MHz to 37 GHz in NLOS microcell environment. Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. IEEE 26th Annual International Symposium, 2015.

LEE, W. C. Y. **Mobile Communications Engineering: Theory and Applications**. 2nd edition ed. [s.l.] McGraw Hill, 1997.

MANITO, R. DA R. Estudo de viabilidade de rádio enlace. **lume.ufrgs.br**, 2010.

MEDEIROS, Júlio César. **O Princípio das Telecomunicações: Teoria e Prática**. 5. Edição, página 520. São Paulo: Editora Érica, 2016.

MENDONÇA, F.A. et. al. (Org.). **Macrozoneamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Tibagi/PR**. Londrina; Ed. UEL, 2000.

MENG, Y. S.; & LEE, Y. H. **Investigations of foliage effect on modern wireless communication systems**. A review. *Progress In Electromagnetics Research*, 105, 313-332. (2010).

MKONGWA K., LIU, O. **Link Reliability and Performance Optimization in Wireless Body Area Networks**. *IEEE Access* pp(99). 2019.

MO, H., Chen, B., Shen, C. **Radio propagation prediction model for maritime mobile communication**. *IET International Conference on Wireless Communications and Applications (ICWCA 2012)*, Kuala Lumpur, 2012, pp. 1-5. 2012. doi: 10.1049/cp.2012.2075.

NAKAMURA K., INOUE T. **Impact of Link Availability Uncertainty on Network Reliability: Analyses with Variances**. Published in *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications - IEEE Explore*. 2022.

NASCIMENTO JÚNIOR, Eduil. **Implantação de algoritmo para análise de radiopropagação em aplicações de segurança pública**. 2013. 136 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Defesa: Curitiba, 27/09/2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/33770>. Acesso em: 21 fev. 2022.

NETO, V.; PETRUCCI, L.; SÉRGIO, P. **Telecomunicações: Sistemas de Propagação de Rádio Enlace**. Editora Érica, 1999.

OTOBO, T. M. S., FILHO H. T., **An Innovative Graphical Viewer Analysis Applied in a Multipoint Transmission System**. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82473-82490, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923371.

PARSONS J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. Willey, 2000.

PEREIRA, Marco Antonio Betini. **Análise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba - PR na faixa de frequência de 1800 MHz**. 2007. 142f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Defesa: Curitiba, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/12325>. Acesso em: 22 fev. 2024.

RAPPAPORT T. S.: **Wireless Communications: principles and practice**. pg. 87 – 122. Cambridge University Press. 2024.

RAPPORT T. S. **Wireless communications: principles and practices**. 2nd ed. Englewood Cliffs. Prentice-Hall. 2002.

RIBEIRO, J. A. J. **Propagação em Espaço Livre: Propagação de Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações**. 1a. ed. Érica: São Paulo 2004. p. 163–204 e 241–270. ISBN 857194993x.

RIVERA, A. V. **Lee Microcell Propagation Model: A Complex Case Empirical Study**. WSEAS Transactions on Communications, v. 14, pg. 33 – 42. 2015

ROCHE, G. D. La, GLAZUNOV, A. A. and ALLEN, B. **LTE - Advanced and Next Generation Wireless Networks: Channel Modelling and Propagation**. Wiley. 2012.

SALEMA, C. **Feixes hertzianos**. 2a. ed. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico. 2002. v. 4, p. 23–540. ISBN 972-8469-21-7.

SILVA, G.; BARRADAS, O. **Sistemas radio visibilidade**. EMBRATEL. Telecomunicações. 2a. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos: Embratel, 1978. v. 1, p. 17–64.

SILVA, J. C.; SIQUEIRA, G. L.; CASTELLANOS, P. V. G. (2018). **Propagation Model for Path Loss through Vegetated Environments at 700–800 MHz Band**. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 17(1), 179-187.

SILVESTER, P. P., FERRARI, K. L. **Finite Elements for Electrical Engineers**. Cambridge University Press. Cambridge, 1983.

SIROTKIN, Sasha. **5G Radio Access Network Architecture: The Dark Side of 5G** Wiley-IEEE Press; 1st edition. 2020.

SORRENTINO, R. **Numerical Methods for Passive Microwave and Millimeter Wave Structures**, IEEE Press, United States of America. 1989.

STAHLKE, Ronald Ferdinand. **Análise e estudo da influência dos efeitos atmosféricos na propagação de ondas eletromagnéticas na faixa SHF: estudo de caso e aplicação a um enlace operando em 23,6 GHz**. 2006. 95f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Defesa: Curitiba, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/8157>. Acesso em: 21 fev. 2022.

TELLES, D. **Ciclo ambiental da água: da chuva à gestão** (1a Edição). Editora Edgard Blucher Ltda. 2013.

TERTULIANO, H. S. F. **Concepção de Rádio enlace em Altas Frequências**. Editora UFPR. 2017.

TONETTI, E. L.; NUCCI, J. C.; SOUZA, F. X. S.; VALASKI, S. **Alagamentos frequentes na área urbana de Paranaguá - PR**. Geografia, Londrina, v.22, n.2, p.43-56, 2013.

TORRES, A. P., DA SILVA, C. B., TERTULIANO, H. F. **An Experimental Study on the Use of LoRa Technology in Vehicle Communication**. IEEE Access JCR, vol. 9, pg. 26633-26640. 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3057602

UDRIS A. **Shoreline Effect: Why NDB signals bend as they cross the coast**. Disponível em: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/navigation/shoreline-effect/>. Acesso em: 25 set. 2023

VANHONI, F.; MENDONCA, F. A. **O clima no litoral do Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Climatologia, Curitiba, v.3, n.1, p.49-64, 2008.

VASCONCELOS, L. S. **Comportamento de modelos de cálculo de difração sobre terrenos irregulares nas faixas de VHF e UHF**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/18133/4/ComportamentoModelosCalculo.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2023.

VENKATESWARA RAO, Ch., PADMAVATHY, N. **Effect of Link Reliability and Interference on Two-Terminal Reliability of Mobile Ad Hoc Network**. Advances in data Computing, Communication and Security, pg. 555-565, 2022.

VOGEL, W.; GOLDBIRSH, J. **Tree attenuation at 869 MHz derived from remotely piloted aircraft measurements**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34, n. 12, p. 1460-1464, 1986.

WEISSBERGER, M. A. **An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees**. Department of Defense, Electromagnetic Compatibility Analysis Center, 1982.