



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THALES MATHIAS MARQUES

**ELABORAÇÃO DE *SOFTWARE* EM PYTHON PARA
CÁLCULO DA MARGEM DE SISTEMAS DE
RADIOENLACES PONTO A PONTO NA FAIXA DE
3 A 33 GHZ**

Palmas/TO
2021

THALES MATHIAS MARQUES

**ELABORAÇÃO DE *SOFTWARE* EM PYTHON PARA
CÁLCULO DA MARGEM DE SISTEMAS DE
RADIOENLACES PONTO A PONTO NA FAIXA DE
3 a 33 GHz**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Dr. Eliel Poggi dos Santos

Palmas/TO
2021

<https://sistemas.uft.edu.br/ficha/>

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M357e Marques, Thales Mathias.

Elaboração de software em python para cálculo da margem de sistemas de radioenlaces ponto a ponto na faixa de 3 a 33 GHz. / Thales Mathias Marques. – Palmas, TO, 2021.

103 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.

Orientador: Eliel Poggi Dos Santos

1. Radioenlaces ponto a ponto. 2. Elaboração de software em Python. 3. Comunicações sem fio. 4. Micro-ondas e Antenas. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

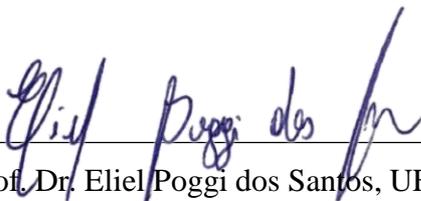
THALES MATHIAS MARQUES

ELABORAÇÃO DE *SOFTWARE* EM PYTHON PARA CÁLCULO DA MARGEM DE SISTEMAS DE RADIOENLACES PONTO A PONTO NA FAIXA DE 3 a 33 GHz

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 04 / 05 / 2021

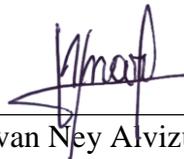
Banca Examinadora



Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos, UFT



Prof. Dr. Humberto Xavier de Araújo, UFT



Prof. Dr. Ivan Ney Arvizuri Romani, UFT

Palmas, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Rosimar Mathias Marques e a meu irmão Caíque Mathias Marques que me apoiaram sempre, mesmo com a distância geográfica, com todo amor e carinho, fazendo com que essa caminhada fosse possível.

Agradeço também a minha família em especial a minha tia Iolete Maria Marques Ribeiro Nogueira e ao meu tio Sávio César Nogueira que me cederam moradia com carinho e paciência durante meus anos de faculdade e também a meu primo Lucas Marques Nogueira que começou essa jornada junto comigo, ele em Engenharia Civil e eu em Engenharia Elétrica.

Também deixo meus agradecimentos a todos meus amigos que auxiliaram para que o decorrer do curso fosse mais leve e mais divertido compartilhando as dificuldades do curso e sendo presentes nos momentos difíceis e nos de comemoração também.

Aos professores do curso que transmitiram conhecimento somando em cada parcela do aprendizado que deu toda a base para que eu possa vir a ser um profissional competente, em especial ao Professor Doutor Eliel Poggi dos Santos que me orientou nesse projeto tão importante para minha formação.

A toda equipe do meu estágio que possibilitou o conhecimento de diversas áreas das telecomunicações, inclusive me apresentando o tema do trabalho final.

Por fim agradeço a cada pessoa que mesmo em breves momentos me ajudou de qualquer forma a concluir o curso, seja tornando o caminho mais leve ou então me ajudando diretamente em qualquer uma das nuances envolvidas na minha formação.

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar um *software* capaz de obter a margem de um enlace de rádio ponto a ponto que opere na frequência de *Super High Frequency* (SHF, Frequência Super Alta), 3 a 30 GHz, em linguagem Python. A estrutura é dividida em quatro partes, demonstração da teoria envolvida na propagação das ondas eletromagnéticas no espaço livre, demonstração dos cálculos necessários para o projeto e dimensionamento de um enlace ponto a ponto, o detalhamento da elaboração do *software* e por fim demonstração dos resultados, comparando os parâmetros obtidos através do programa desenvolvido e de programas já existentes como o *Radio Mobile* e *LinkPlanner*.

A demonstração da teoria é pautada na apresentação da teoria das ondas eletromagnéticas e do espectro magnético e então são apresentados os fenômenos que causam interferências na propagação de ondas no espaço livre. A demonstração dos cálculos necessários para o projeto e dimensionamento de um enlace de rádio ponto a ponto apresenta as equações para obtenção dos valores numéricos das atenuações sofridas. O detalhamento da elaboração do *software* apresenta a definição das funções e a programação dos cálculos demonstrados no anteriormente. A demonstração dos resultados faz uma análise comparativa dos dados obtidos através do programa elaborado com os dados obtidos através de programas já existentes, a fim de demonstrar o desempenho do trabalho frente a trabalhos já existentes.

Palavras-chaves: Enlace de rádio ponto a ponto. Python. SHF.

ABSTRACT

This present work aims to show a software able to calculate the margin of a radio relay system operating on SHF frequency, 3 to 30 GHz, in Python programming language. The structure is divided in four parts, theory of electromagnetic waves propagation in free space, the necessary math to calculate the main parameters in radio link projects, detailing the step-by-step in synthesis of the software and the demonstration of results comparing with other softwares. The theory is presented since the electromagnetic wave propagation theory to phenomena that interfere in wave propagation in the free space. The math involved theorizes the attenuation incident in electromagnetic waves that interfere the radio relay systems parameters. The software detailing shows all functions and programming skills involved in the project. The last part shows the results obtained by the software and compares to results obtained in softwares already existent.

Key-words: Radio relay system. Python. SHF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Esquema de um sistema de radioenlace.....	16
Figura 2- Representação de propagação da onda	21
Figura 3- Espectro Eletromagnético.....	24
Figura 4- Propagação da onda no vácuo.....	27
Figura 5- Propagação da onda na atmosfera.....	27
Figura 6- Representação geométrica da Lei de Snell.....	28
Figura 7- Variações do fator K.....	30
Figura 8- Valor de K excedido para 99,9% do tempo no pior mês do ano.....	31
Figura 9- Difração em um enlace.....	31
Figura 10- Distribuição mundial da taxa pluviométrica a 0,01% do tempo.....	33
Figura 11- Perda adicional por difração.....	35
Figura 12- Perfil de Terreno.....	36
Figura 13- Elipse que descreve a primeira zona de Fresnel.....	36
Figura 14- Ponto de reflexão.....	37
Figura 15- Melhor separação entre as antenas.....	38
Figura 16- Esquemática do VSWR.....	42
Figura 17- Modelagem da antena.....	43
Figura 18- Esquemático da Antena Yagi.....	45
Figura 19- Antena refletora de canto em configuração de malha de fios.....	46
Figura 20- Princípio de uma antena parabólica excitada pelo foco.....	47
Figura 21- Torre tubular.....	48
Figura 22- Torre Autoportante.....	49
Figura 23- Torre Estaiada.....	50
Figura 24 – Diagrama de fluxo do programa.....	62
Figura 25– Atenuação devido aos gases atmosféricos, calculados em intervalos de 1 GHz....	74
Figura 26– Atenuação devido aos gases atmosféricos gerados em Python.....	75
Figura 27– Coeficiente k para polarização horizontal obtido na ITU-R P. 838-3.....	76
Figura 28– Coeficiente k para polarização horizontal obtido no Python.....	76
Figura 29– Coeficiente k para polarização vertical obtido na ITU-R P. 838-3.....	76
Figura 30– Coeficiente k para polarização vertical obtido no Python.....	76
Figura 31– Coeficiente α para polarização horizontal obtido na ITU-R P. 838-3.....	77
Figura 32– Coeficiente α para polarização horizontal obtido no Python.....	77
Figura 33 – Coeficiente α para polarização vertical obtido na ITU-R P. 838-3.....	77
Figura 34– Coeficiente α para polarização vertical obtido no Python.....	77
Figura 35– Entrada de dados no programa desenvolvido.....	80
Figura 36– Resultados obtidos no programa desenvolvido.....	80
Figura 37– Simulação de enlace utilizando o <i>airLink</i>	82
Figura 38– Perfil de terreno obtido pelo <i>LinkPlanner</i>	82
Figura 39– Dados obtidos pela simulação no <i>LinkPlanner</i>	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura das Bandas	25
Tabela 2- Nomenclatura das Faixas de Frequência de acordo com o PDFF.....	26
Tabela 3- Tabela das taxas pluviométricas excedidas em 0,01% do tempo por região do Brasil.....	33
Tabela 4- Coeficientes para determinação da atenuação específica da chuva.....	34
Tabela 5- Distância do enlace estudado.....	73
Tabela 6– Comparação da atenuação do espaço livre.....	74
Tabela 7– Dados das estações utilizadas na simulação do enlace.....	78
Tabela 8– Comparação de dados simulados pelo programa e pelo <i>LinkPlanner</i>	83
Tabela 9 – Vantagens e desvantagens dos <i>softwares</i> utilizados.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Código para cálculo da distância entre dois pontos.....	64
Quadro 2– Código para cálculo da Atenuação no espaço livre.....	64
Quadro 3- Código para cálculo da atenuação pelos gases no espaço livre.....	65
Quadro 4- Código para obtenção de k com polarização horizontal.....	66
Quadro 5- Código para obtenção de k com polarização vertical.....	67
Quadro 6- Código para obtenção de k com polarização linear ou circular.....	67
Quadro 7- Código para obtenção de α com polarização horizontal.....	68
Quadro 8- Código para obtenção de α com polarização vertical.....	69
Quadro 9- Código para obtenção de α com polarização linear ou vertical.....	69
Quadro 10- Código para obtenção do caminho efetivo do enlace.....	70
Quadro 11- Código para obtenção da absorção devido às chuvas.....	70
Quadro 12- Código para obtenção da atenuação do guia de onda.....	71
Quadro 13- Código para obtenção da atenuação total.....	71
Quadro 14- Código para obtenção da potência de recepção.....	71
Quadro 15- Código para obtenção da margem do enlace.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
F/B	Relação Frente Costa
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union Radiocommunication Sector</i>
PDFF	Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de
Frequências no Brasil	
RF	Rádio Frequência
Rx	Estação receptora
SHF	<i>Super High Frequency</i>
STEL	Sistema de Serviços de Telecomunicações
Tx	Estação transmissora
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
XPD	Polarização cruzada

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{0,01}$	Atenuação devido às chuvas
A_a	Atenuação pelos gases da atmosfera
A_c	Atenuação do guia de onda
A_d	Atenuação por difração
A_e	Atenuação no espaço livre
A_{rmf}	Atenuação total no circuito de ramificação
A_t	Atenuação Total Líquida
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético
\vec{D}	Densidade de fluxo elétrico
D_t	Degradações por interferência
\vec{E}	Campo elétrico
F_1	Raio da primeira elipsoide de Fresnell
G_{RX}	Ganho da antena receptora
G_{TX}	Ganho da antena transmissora
\vec{H}	Campo magnético
M_t	Margem do enlace
P_{RN}	Nível de recepção nominal
P_{RSES}	Limiar de recepção do equipamento
P_{RX}	Potência de recepção do sistema
P_{TX}	Potência de transmissão do sistema
d_{eff}	Distância efetiva do enlace
p_0	Fator de ocorrência por múltiplos caminhos
γ_0	Atenuação específica devido ao ar seco
γ_R	Atenuação específica da chuva
γ_w	Atenuação específica devido ao vapor de água
A	Abertura da antena em metros quadrados
D	Disponibilidade do enlace
e	Pressão de vapor de água
f	Frequência da onda
FFM	Margem líquida do enlace
K	Fator geoclimático
k	Fator para correção de frequência na chuva
N	Índice de refração do ar
n	Índice de refatividade do ar
N	Índice de refração do ar
p	Pressão do ar
R	Taxa pluviométrica
T	Temperatura em Kelvin
v	Velocidade de propagação da onda
α	Coefficiente para correção da frequência na chuva
η	Eficiência de abertura
λ	Comprimento de onda
P_{in}	Potência de entrada
U	Intensidade de radiação
ρ	Densidade do vapor de água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo Geral.....	19
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
1.3	Metodologia	19
1.4	Estrutura do Trabalho.....	20
2	PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	21
2.1	Equações de Maxwell.....	22
2.2	Espectro de RF.....	23
2.3	Propagação das Ondas na Atmosfera.....	26
2.3.1	Refração.....	28
2.3.1.1	Índice de Refração da Atmosfera.....	29
2.3.1.2	Raio de Curvatura relativo à Terra.....	29
2.3.1.3	Fator K.....	30
2.3.2	Difração.....	31
2.3.3	Reflexão.....	32
2.3.4	Atenuação Devido à Chuva.....	32
2.3.5	Atenuações da Atmosfera.....	35
2.4	Perfil de Terreno.....	35
2.4.1	Zona de Fresnel.....	35
2.4.2	Reflexões no caminho.....	37
2.4.2.1	Método Geométrico utilizando zonas de Fresnel.....	37
2.4.2.2	Método Analítico.....	38

3	SISTEMA AÉREO.....	40
3.1	Antenas.....	40
3.1.1	Parâmetros principais das antenas.....	40
3.1.1.1	Ganho.....	40
3.1.1.2	Relação Frente Costa.....	41
3.1.1.3	VSWR.....	42
3.1.1.4	Polarização.....	43
3.1.1.5	Ângulo de meia potência.....	43
3.1.1.6	Estabilidade Mecânica.....	44
3.1.2	Tipos de Antenas.....	44
3.1.2.1	Antenas Yagi.....	44
3.1.2.2	Antenas refletoras de canto.....	45
3.1.2.3	Antenas de Painel Plano.....	46
3.1.2.4	Antenas Parabólicas.....	46
3.2	Torres.....	48
3.2.1	Torres Tubulares.....	48
3.2.2	Torres Autoportantes.....	49
3.2.3	Torres Estaiadas.....	49
3.3	Conectores e Guias de Onda.....	50
4	CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE DO ENLACE.....	51
4.1	Elaboração do Plano de Frequência.....	51
4.2	Cálculo da atenuação.....	52
4.2.1	Atenuação no Espaço Livre (A_e).....	52
4.2.2	Atenuação pelos gases da atmosfera (A_a).....	53
4.2.3	Atenuação devido às chuvas ($A_{0,01}$).....	55
4.2.4	Atenuação por difração (A_d).....	56

4.2.5	Atenuação dos circuitos de ramificação (A_{rmf}).....	57
4.2.6	Atenuação do guia de onda (A_c).....	57
4.2.7	Atenuação total (A_t).....	58
4.2.8	Balanço de potência.....	58
4.2.9	Nível de Recepção Nominal.....	58
4.3	Cálculo da Disponibilidade.....	58
4.4	Degradações por Interferência.....	59
4.4.1	Interferências do mesmo enlace.....	60
4.4.2	Interferências de canal adjacente.....	60
4.5	Margem do Enlace.....	60
5	ELABORAÇÃO DO PROGRAMA.....	61
5.1	Escolha da linguagem.....	61
5.2	Funcionamento do programa.....	61
5.3	Cálculo da distância.....	63
5.4	Funções para atenuação na atmosfera.....	64
5.4.1	Atenuação do espaço livre: $at_espacolivre(freq, distenlace)$	64
5.4.2	Atenuação pelos gases da atmosfera: $at_absorcao_atm(dist, freq, densidade_vapor)$	64
5.5	Função para atenuação devido às chuvas.....	65
5.5.1	Coefficiente k	65
5.5.2	Coefficiente α	68
5.5.3	Caminho efetivo do enlace.....	70
5.5.4	Atenuação devido à absorção das chuvas: $at_especifica_chuva(alfa, k, intensidade_chuva, caminho_efetivo)$	70
5.6	Atenuação do guia de onda.....	71
5.7	Atenuação total.....	71
5.8	Potência de recepção do sistema.....	71

5.9	Margem do enlace.....	72
6	RESULTADOS.....	73
6.1	Cálculo da distância.....	73
6.2	Atenuação do espaço livre (A_e).....	73
6.3	Atenuação pelos gases da atmosfera (A_a).....	74
6.4	Atenuação devido às chuvas ($A_{0,01}$).....	75
	6.4.1 Coeficiente k	75
	6.4.2 Coeficiente α	76
6.5	Aplicação do <i>software</i>	78
6.6	Comparação com outros <i>softwares</i>	81
	6.6.1 Comparação dos dados.....	83
7	CONCLUSÃO.....	85
7.1	Contribuições do trabalho.....	85
7.2	Trabalhos futuros.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A – <i>distancia.py</i>.....	90
	APÊNDICE B – <i>atenuacaochuva.py</i>.....	91
	APÊNDICE C – <i>atenuacaoatmosfera.py</i>.....	96
	APÊNDICE D – <i>principal.py</i>.....	97
	ANEXO A – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DA ATENUAÇÃO ESPECÍFICA DAS CHUVAS.....	100

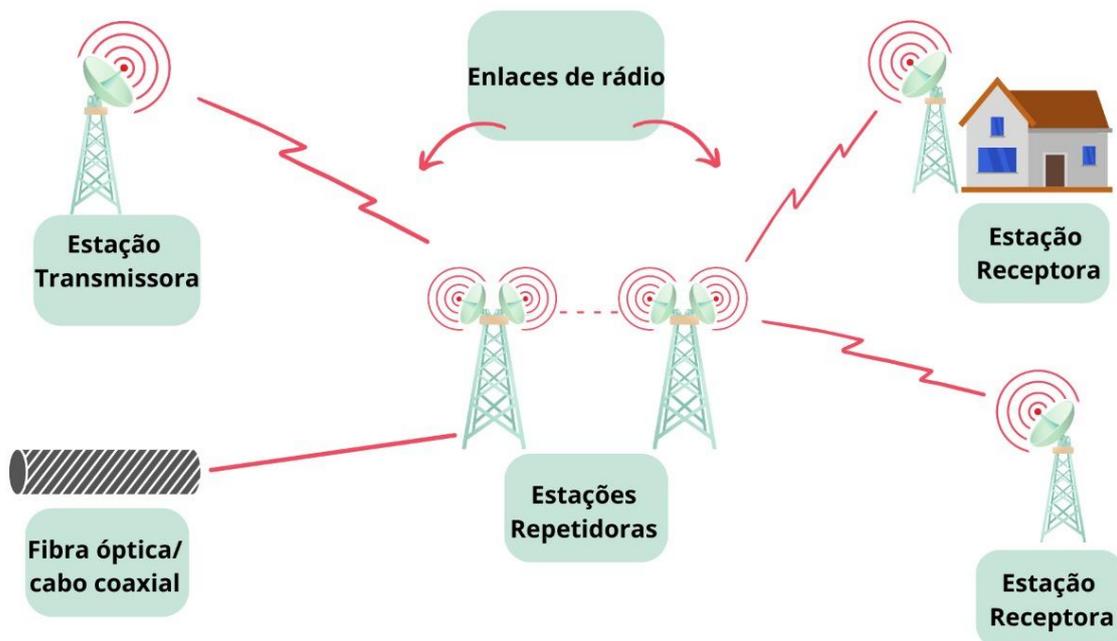
1 INTRODUÇÃO

Os enlaces de rádio são sistemas que transmitem informações através de ondas eletromagnéticas em uma determinada frequência, essa transmissão é realizada sem fios através de antenas sólidas e vazadas (DIAS *et. al.*, 2016). Esses radioenlaces são utilizados em sistemas de transmissão de dados, voz e mídia. Isso faz com que o estudo desse sistema de comunicação seja necessário para estabelecer a troca de dados necessária para a manutenção das atividades e serviços utilizados hoje em dia.

A comunicação é estabelecida entre duas estações: uma transmissora (Tx) e outra receptora (Rx). Para satisfazer as condições necessárias para a troca de informações o posicionamento, dessas estações, deve ser feito de maneira alinhada e sem obstruções, em uma faixa de frequência que atenda os serviços utilizados pelo sistema e para tanto devem ser observadas as atenuações relacionadas a distância, frequência e outras características (DIAS *et. al.*, 2016).

A configuração de um sistema desse tipo é esquematizada na Figura 1:

Figura 1 – Esquema de um sistema de radioenlace.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como apresentado na Figura 1, o sinal, em um enlace ponto a ponto, pode ser originado tanto através de um meio físico, cabos e fibras, como também através de outro enlace. A partir desse ponto são feitos os enlaces carregando informações de dados e/ou voz de um usuário a usuário.

Piau *et. al.* (2014) define que a comunicação por voz e dados é feita basicamente por enlaces ou fibras, as fibras são vantajosas devido à capacidade de transmissão, já os enlaces ganham no tempo de instalação e custo.

É possível listar como vantagens do uso de radioenlaces: a grande capacidade de transmissão de dados, mesmo perdendo nesse ponto em relação as fibras ópticas os enlaces oferecem uma largura de banda grande, satisfatório em confiabilidade e continuidade, podendo trabalhar com altas frequências e potências; menor custo para instalação, por não possuir custos com eletrodutos; e instalação simples (BERMUDÉZ, 2019).

A faixa de *Super High Frequency* (SHF, Frequência Super Alta) é amplamente utilizada em diversos serviços como o serviço móvel pessoal, serviço de comunicação multimídia, telefone fixo comutado, serviço limitado privado, rádio digital entre outros descrito no Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDFF) da Anatel. Essa faixa constitui as frequências de 3 a 33 GHz, ondas centimétricas, sistemas sensíveis que sofrem diversas atenuações durante sua propagação.

O projeto de um radioenlace deve ser feito considerando as perdas ocasionadas por efeitos atmosféricos e causados por hidrometeoros, para que seja possível a idealização de um sistema com equipamentos adequados que forneçam o nível de recepção necessário para funcionamento do sistema. A ITU-R P. 530, é a recomendação da *International Telecommunication Union* (ITU, em português, União Internacional de Telecomunicações), feita pelo setor de radiocomunicações, com título: *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems* (Dados de propagação e métodos de previsão necessários para o projeto de sistemas com linha de visada direta), que segundo a própria ITU-R P 530-17 (2017) fornece métodos de previsão de perdas, a serem consideradas no desenho de enlaces com visada direta, tanto em céu limpo quanto em tempo chuvoso, assim como técnicas de diminuição de intempéries da propagação terminando com recomendações para tratamento de erros e disponibilidade do sistema.

A descrição dos métodos apresentados na ITU-R P 530-17 (2017) apresenta diversos cálculos que caso sejam realizados a mão podem demandar muito tempo e dificultar a organização dos resultados obtidos. Uma possível solução para esse problema pode ser a implementação de um programa computacional que calcule as perdas descritas. Dessa forma é proposto o desenvolvimento de um algoritmo capaz de executar tais cálculos na linguagem Python.

As vantagens da utilização de Python para programação de cálculos de perdas em radioenlaces são diversas e citadas por diversos autores. Cañadas (2018) destaca que a grande

quantidade de bibliotecas de Python, robustas e completas, que apresentam execuções matemáticas simplificadas tornam a linguagem ideal para projetos de radioenlaces. Ainda é citado por Gala (2019) Python pode ser utilizado por ser uma linguagem interpretada, de tipagem dinâmica, fortemente tipada, caracterizada por ser multiplataforma, multiparadigma, com um código limpo e ordenado devido sua indentação.

A finalidade deste trabalho é desenvolver um *software* capaz de realizar cálculos das perdas de um projeto de rota de micro-ondas ponto a ponto a partir da ITU-R P 530 e de outros métodos. Explanando a base teórica envolvida nesse tipo de projeto, especificando e detalhando um passo a passo e os principais parâmetros que podem influenciar no sistema, a fim de compreender todo o funcionamento e a motivação dos cálculos realizados pela ferramenta computacional. fim de compreender todo o funcionamento e a motivação dos cálculos realizados pela ferramenta computacional.

1.1 Justificativa

Os serviços de telecomunicações são considerados como essenciais (BRASIL, 2020), logo eles precisam de sistemas confiáveis e com disponibilidade constante, entregues para toda comunidade em território nacional. Para estabelecer a prestação desses serviços, principalmente em lugares remotos, muitas das vezes apenas o radioenlace ponto a ponto é economicamente e tecnicamente viável, fazendo com que esses enlaces sejam utilizados tanto como sistema primário como sistema redundante.

Muitos autores como Manning (2009), Rappaport (2008) e Piau *et. al.* (2014), alertam que apesar do avanço contínuo de outras maneiras de transmissão de dados, como a transmissão guiada por fibra óptica, os enlaces de rádio não deixarão de ser utilizados nas telecomunicações, devido a seu custo de instalação mais baixo e também capacidade de transmissão em grandes distâncias, ou até mesmo como sistemas redundantes, sendo assim ainda objetos de estudo interessantes.

A possibilidade de saturação dos espectros de frequência utilizados em enlaces de rádio implica em um planejamento bem feito desses enlaces para que não haja interferências e que o sistema não fique indisponível.

Sabendo da necessidade de um planejamento bem organizado e estruturado, a utilização de um *software*, para realizar os cálculos e obter os parâmetros técnicos da forma correta, é uma ferramenta muito útil para visar a aceleração e o processo de idealização e concepção do projeto, e caso esse seja realizado de maneira eficiente elimina a possibilidade de erro nos cálculos,

diminuindo a chance de que haja erros no projeto evitando interferências e estabelecendo uma comunicação eficiente.

1.2 Objetivos

Os objetivos que motivam a realização do trabalho estão divididos em:

1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar um programa em Python que calcula as perdas em um projeto de enlace de rádio ponto a ponto, a fim de obter a margem de recepção de um sistema operando na faixa de SHF.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Detalhar o passo a passo para a realização de um projeto de radioenlace ponto a ponto;
2. Desenvolver um código capaz de realizar os cálculos das perdas, potência de recepção e margem de operação de um projeto de radioenlace;
3. Fazer a simulação de um projeto a partir do *software* elaborado no decorrer do trabalho.

1.3 Metodologia

A primeira parte desse trabalho apresentará, através de uma pesquisa descritiva dos fundamentos teóricos existentes sobre um tema, levantamento bibliográfico, através de livros, artigos e trabalhos acadêmicos, utilizando uma metodologia dedutiva através de fenômenos físicos descritos através do eletromagnetismo, quanto a propagação da onda e radiodifusão.

A escrita do código será realizada através de uma pesquisa qualitativa utilizando o método hipotético-dedutivo idealizando um projeto capaz de realizar os cálculos necessários para o projeto, respeitando as etapas de elaboração de *software*, através de pesquisas exploratórias em material acadêmico de trabalhos correlatos e artigos científicos que exploram o assunto.

1.4 Estrutura Do Trabalho

O trabalho foi dividido em 7 capítulos, sendo eles descritos abaixo.

O Capítulo 2 demonstra a propagação das ondas eletromagnéticas no espaço livre, bem como as equações matemáticas que descrevem tais. Também são apresentadas as faixas de frequência utilizadas para cada serviço de telecomunicações. São descritos eventos que interferem o sinal.

O Capítulo 3 descreve o sistema aéreo necessário para aplicar esses sistemas em relação aos equipamentos, torres e antenas mostrando a estrutura presente nesse tipo de projeto.

O Capítulo 4 apresenta as etapas da realização de um projeto de rota de microondas, detalhando cada uma e apresentando a aplicação da teoria apresentada nos capítulos anteriores.

O Capítulo 5 descreve o programa elaborado demonstrando as bibliotecas e métodos de programação utilizadas.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados do trabalho, utilizando um exemplo real para cálculo dos parâmetros e comparando esses resultados com resultados de programas diferentes.

No Capítulo 7 são tecidas as conclusões obtidas através da realização desse trabalho.

2 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A propagação das ondas eletromagnéticas é feita entre uma antena Tx (transmissora) e uma Rx (receptora), sendo essas associadas aos campos elétricos e magnéticos. O campo elétrico é formado através de alterações em espaços próximos de uma carga. O campo magnético se dá através da circulação de uma corrente em um material condutor, o que irá criar um campo magnético (PIAU, 2013).

A representação das ondas eletromagnéticas propagadas no espaço é feita através de ondas senoidais, sendo uma senoide para cada campo. Os parâmetros representados são a amplitude, frequência, fase e comprimento de onda (ONGARATO, 2009). Para estudo da propagação das ondas eletromagnéticas também é possível caracterizar a onda através da velocidade de propagação, descrita na equação 1:

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Temos:

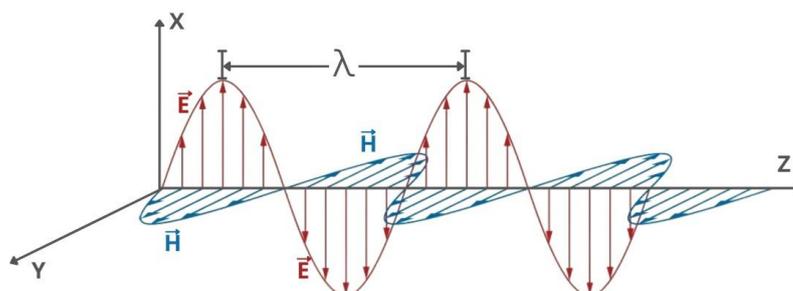
v : velocidade de propagação da onda, no vácuo é constante $3 \cdot 10^8$ m/s;

λ : comprimento de onda;

f : frequência da onda.

O campo elétrico e o campo magnético se propagam perpendicularmente. Um parâmetro utilizado para descrever a propagação dessas ondas é a polarização, sendo essa definida de acordo com o campo elétrico, sendo a polarização vertical, quando o campo é perpendicular a superfície da terra, ou horizontal, quando é paralelo com a superfície da Terra. A Figura 2 mostra uma representação desses campos.

Figura 2 – Representação de propagação da onda.



Na Figura 2 estão representados:

\vec{E} : Campo Elétrico;

\vec{H} : Campo Magnético;

λ : comprimento de onda.

A equação 1 indica que quanto maior a frequência menor será o comprimento de onda. Os sistemas de rádio frequência, RF, e micro-ondas utilizam frequências altas, logo os comprimentos de onda são pequenos. Isso faz com que os fenômenos envolvidos nesses sistemas não possam ser descritos pela teoria básica de circuitos elétricos. Nesses projetos a teoria eletromagnética utilizada é descrita pelas leis de Maxwell. As equações de Maxwell são matematicamente complexas, pois envolvem operações vetoriais, diferenciais e integrais, com o vetor campo, em que esse campo é representado em funções das coordenadas espaciais (POZAR, 2012).

2.1 Equações de Maxwell

Em 1873 Maxwell publicou sua teoria que descrevia o comportamento das ondas eletromagnéticas no nível macroscópico. Seu estudo resumiu os estudos produzidos anteriormente nessa área, principalmente, através das descobertas experimentais de Hertz e também das teorias desenvolvidas por Gauss, Ampère e Faraday (POZAR, 2012).

As equações de Maxwell podem ser apresentadas na forma diferencial em quatro equações, são elas:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - \vec{J} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

\vec{E} : Campo elétrico, em Volt por metro (V/m)

\vec{H} : Campo magnético, em Ampère por metro (A/m)

\vec{D} : Densidade de fluxo elétrico, em Coulomb por metro ao quadrado (C/m²)

\vec{B} : Densidade de fluxo magnético, em Webers por metro ao quadrado (Wb/m²)

\vec{M} : É uma densidade de corrente magnética fictícia, em Volts por metro ao quadrado (V/m²)

\vec{J} : Densidade de corrente elétrica, em Ampère por metro ao quadrado (A/m²)

ρ : Densidade de carga elétrica, em Coulomb por metro cúbico (C/m³)

Os campos têm como fonte \vec{M} , \vec{J} e ρ . \vec{M} é um parâmetro que não existe realmente, ele é apenas uma ferramenta matemática, pois as correntes magnéticas são consequência da circulação de uma corrente elétrica, ainda não se tem conhecimento de monopolos magnéticos que seria o fator que possibilitaria a existência dessas correntes por si só (POZAR, 2012).

\vec{D} se associa com \vec{E} através da permissividade elétrica ϵ e \vec{B} se associa com \vec{H} através da permeabilidade magnética μ . Temos então:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (6)$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (7)$$

Através de cálculos é possível transformar as equações de Maxwell da forma diferencial para a forma integral. Após as manipulações obtém-se os seguintes resultados:

$$\oint_S \vec{D} \cdot dS = \int_V \rho dv = Q \quad (8)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot dS = 0 \quad (9)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot dS - \int_S \vec{M} \cdot dS \quad (10)$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot dl = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \cdot dS + \int_S \vec{J} \cdot dS \quad (11)$$

Na equação 8 Q é a carga dentro da superfície.

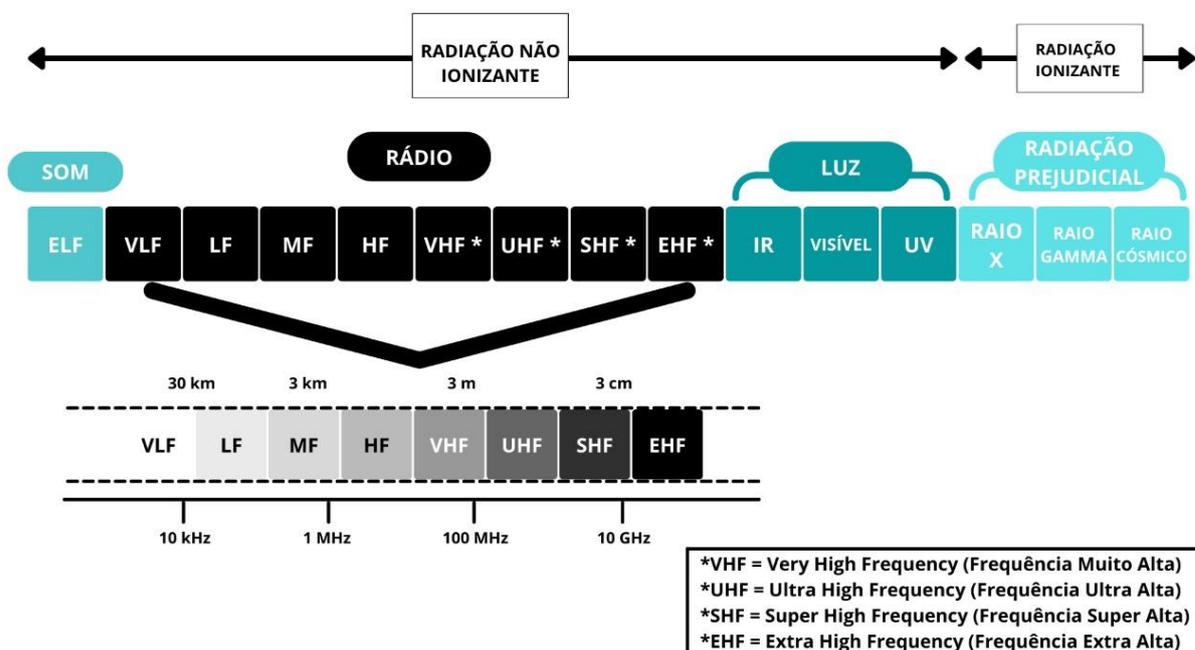
Essas equações descrevem matematicamente o comportamento de ondas eletromagnéticas, algumas possuem caráter experimental, o que faz com que elas não possam ser provadas, mas a aplicabilidade pode ser verificada em qualquer situação (REITZ, 1982). Como visto o manuseio dessas equações depende de cálculos vetoriais na forma integral e diferencial. Existem estudos que visam simplificar a parte matemática, apresentando uma teoria mais simples, a teoria dos campos (POZAR, 2012).

2.2 Espectro de RF

Os projetos de RF abrangem o espectro de frequências de *very high frequency* (VHF – frequência muito alta) (30-300MHz) até *ultra high frequency* (UHF – frequência ultra alta) (300-3000 MHz) e projetos de micro-ondas abrangem as frequências entre 3 a 300 GHz (POZAR, 2012).

A ocupação das frequências foi definida pela ITU, ela utiliza de nomenclaturas como VHF, UHF (MANNING, 2009).

Figura 3 – Espectro Eletromagnético.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3 apresenta o espectro de frequências que abrange cada nomenclatura de bandas utilizada pela ITU, sendo que a utilizada nas telecomunicações é a radiação não ionizante. A radiação ionizante é aquela prejudicial à saúde humana. Para esse trabalho o espectro estudado é o de rádio, destacado na Figura 3 com suas respectivas frequências.

Além da nomenclatura apresentada na Figura 3 as bandas utilizadas na faixa de micro-ondas também são conhecidas pela nomenclatura apresentada na Tabela 1. As nomenclaturas dispostas na Tabela 1 que não estão presentes na Figura 3, L, S, C, X, J/Ku, K, Q/Ka, U e O/E, são utilizadas para designação de um serviço específico, por isso é notado que a largura de cada uma dessas bandas é muito menor que as nomenclaturas HF, VHF, UHF, SHF e EHF.

A Tabela 1 mostra a nomenclatura das bandas de frequência mais utilizadas.

Tabela 1 – Nomenclatura das Bandas.

Nomenclatura	Faixa de Frequência
HF	3-30 MHz
VHF	30–300 MHz
UHF	300–3.000 MHz
L	1–2 GHz
S	2–3 GHz
S	3–4 GHz
C	4–8 GHz
SHF	3–30 GHz
X	8–12 GHz
J/Ku	12–18 GHz
K	18–26.5 GHz
Q/Ka	26.5–40 GHz
U	40–60 GHz
O/E	60–90 GHz
EHF	30–300 GHz

Fonte: Adaptado de Manning (2009).

No Brasil a regulamentação das frequências disponíveis para projetos de radioenlace é feita pela Anatel, Agência Nacional de Telecomunicações, no Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil (PDFF) esse documento explicita que a distribuição no Brasil deve estar harmonizada com o as bandas utilizadas pela ITU.

A Tabela 2 é fornecida pela Anatel no PDFF.

Tabela 2 – Nomenclatura das Faixas de Frequência de acordo com o PDFF.

Número da Faixa	Símbolo	Faixa de frequências (excluindo o limite baixo, incluindo o limite alto)	Subdivisão Métrica Correspondente
4	VLf	3 a 30 kHz	Ondas Miriamétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas Quilométricas
6	MF	300 a 3000 kHz	Ondas Hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas Decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas Métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas Decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas Centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas Milimétricas
12		300 a 3000 GHz	Ondas Decilimétricas

Fonte: Anatel (2019).

2.3 Propagação das Ondas na Atmosfera

Nos enlaces de rádio a propagação é feita através da atmosfera, com isso são inseridos alguns parâmetros que não estão inclusos na teoria de propagação de ondas, pois nessas teorias utiliza-se a propagação no vácuo. Para a elaboração de um projeto de enlace devem ser levadas em consideração as condições atmosféricas e de relevo da região.

Na ausência de atmosfera as ondas são propagadas seguindo linhas retas a partir da fonte de radiação, como é ilustrado na Figura 4. Na atmosfera as ondas interagem com as moléculas presentes no meio fazendo com que elas acompanhem a curvatura da terra, como é ilustrado na Figura 5 (HENNE, 1999).

Figura 4 – Propagação da onda no vácuo.



Fonte: Adaptado de HENNE (1999).

Figura 5- Propagação da onda na Atmosfera.



Fonte: Adaptado de HENNE (1999).

A propagação também é influenciada quando não há visão entre o transmissor e o receptor, visada direta, causado por relevo ou construções que impedem essa linha de visão, ocasionando difração. Pode-se citar ainda fenômenos de reflexão que podem ocasionar uma multiplicidade de caminhos diminuindo a intensidade de sinal que chega na estação Rx (RAPPAPORT, 2008).

Para compreensão dos fenômenos que interferem no projeto de dimensionamento do enlace é preciso definir fenômenos como a refração, a difração, a reflexão, atenuação devido à chuva, atenuações da atmosfera. As perdas e fenômenos descritos na ITU-R P. 530 serão descritos em capítulos específicos.

2.3.1 Refração

A lei que descreve o fenômeno de refração da onda é a Lei de Snell. Ela descreve que ao considerarmos uma onda incidindo com um ângulo de incidência arbitrário entre dois meios dielétricos, sendo que esses têm índices de refração diferentes, parte da onda é refletida no meio 1 e a parte que é refratada no meio 2 continua com ângulo diferente (HENNE, 1999). A Lei de Snell é descrita pela seguinte equação:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (12)$$

n_1 : Índice de refração do meio 1;

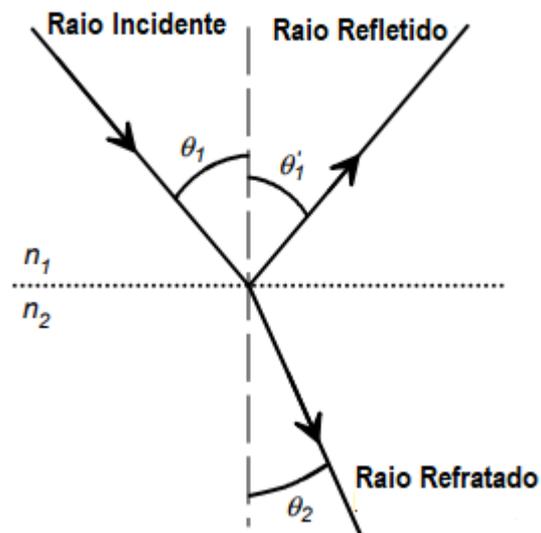
$\sin \theta_1$: seno do ângulo de incidência no meio 1;

n_2 : Índice de refração do meio 2;

$\sin \theta_2$: seno do ângulo de incidência no meio 2.

A Figura 6 ilustra o fenômeno da Lei de Snell:

Figura 6 – Representação geométrica da Lei de Snell.



Fonte: HENNE (1999).

Para dimensionamento de radioenlaces o índice de refração é considerado através do fator K, para compreender esse parâmetro é necessário explicar o índice de refração na atmosfera e o efeito do raio de curvatura relativo à Terra.

2.3.1.1 Índice de Refração da Atmosfera

O índice de rádio refração do ar é dado por:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (13)$$

O índice de refatividade do ar é $n=1.000315$, substituindo valores temos a equação:

$$N = \frac{77.6}{T} \left(p + 4810 \cdot \frac{e}{T} \right) \quad (14)$$

N : Índice de refração do ar;

n : Índice de refatividade do ar;

T : Temperatura em Kelvin;

p : Pressão do ar em mbar;

e : Pressão de vapor de água em hPa.

O valor de N varia com a altitude, pois os valores de temperatura e pressão também se alteram com tal. Existe uma equação exponencial que determina a maneira que N diminui com a altitude:

$$N(h) = N_0 \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right) \quad (15)$$

Na equação $N_0=315$ unidades de N e $h_0=7,35$ km e h é a altura em relação ao solo em quilômetros.

2.3.1.2 Raio de Curvatura relativo à Terra

Devido a atmosfera e ao fenômeno de refração há uma curvatura no percurso percorrido pela onda e essa curvatura depende do gradiente de refatividade (MANNING, 2009). A curvatura do raio é dada por:

$$\frac{1}{r} = -\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dh} \cdot \cos\alpha \quad (16)$$

r : Raio de curvatura;

α : ângulo que o raio forma com a horizontal.

Na equação 16 n é aproximado a 1 e α a 0

O raio de curvatura relativo à Terra é calculado a partir da equação 16 e se relaciona com o raio de curvatura da Terra, através da equação:

$$\frac{1}{r_e} = \frac{1}{a} - \frac{1}{r} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \left(157 + \frac{dN}{dh}\right) \cdot 10^6 \quad (17)$$

a : Raio de curvatura da Terra $a=6370$ km.

É possível assumir $(157 + \frac{dN}{dh})$ como a rádio refratividade modificada $\frac{dM}{dh}$, pode-se afirmar que se $\frac{dM}{dh} = 0$ as ondas de rádio irão se curvar com a mesma curvatura que a Terra tem e se $\frac{dM}{dh} < 0$ as ondas irão se curvar mais que o raio de curvatura da Terra (HENNE, 1999).

2.3.1.3 Fator K

O fator K depende do gradiente de refratividade e ele serve para imaginar que a onda viaja em uma linha reta. Isso faz com que o fator K não retrate o cenário real e deve ser usado para determinar o curso da onda e não para indicar a curva real que a mesma faz (MANNING, 2009).

O fator K é definido por:

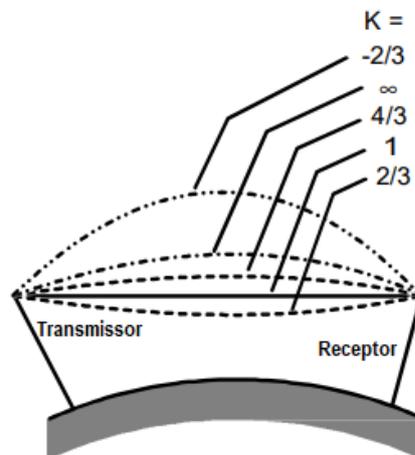
$$K = \frac{r_e}{a} = \frac{1}{\left(\frac{1}{a} + \frac{dn}{dh}\right) \cdot a} = \frac{1}{\left(1 + a \cdot \frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6}\right)} \quad (18)$$

Na atmosfera padrão $\frac{dN}{dh} = -40$. Nessa condição temos o valor de $K = \frac{4}{3}$.

Devem ser considerados dois fatores K , um para a atmosfera padrão, $K_{\text{médio}} = \frac{4}{3}$, e outro chamado $K_{\text{mínimo}}$, definido através do documento (ITU-R 530-09). O $K_{\text{mínimo}}$ varia com o comprimento do enlace e leva em consideração as condições existentes no pior mês do ano. Na prática utiliza-se o $K_{\text{médio}}$ em enlaces curtos e o $K_{\text{mínimo}}$ em enlaces longos (ONGARATO, 2009).

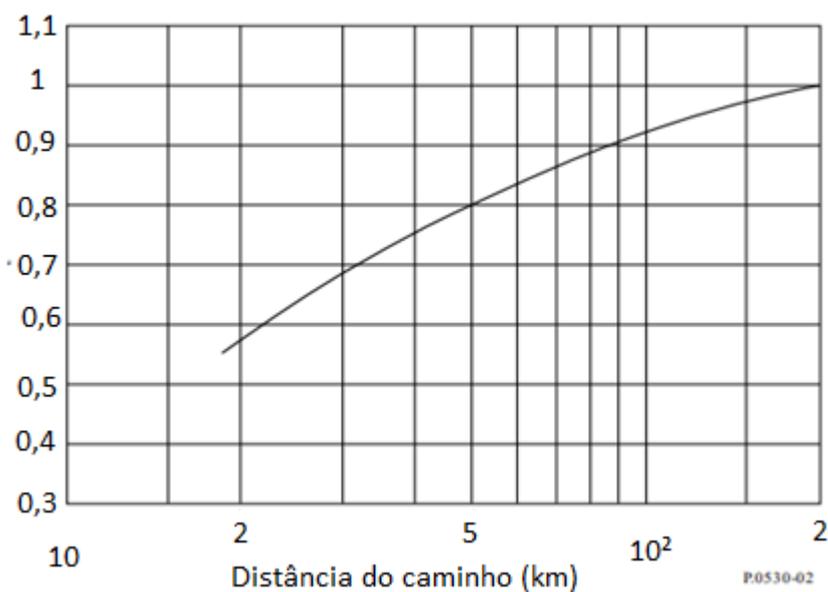
A Figura 7 mostra as variações do fator K e a Figura 8 a variação do $K_{\text{mínimo}}$.

Figura 7 – Variações do fator K .



Fonte: HENNE (1999).

Figura 8 – Valor de K excedido para 99,9% do tempo no pior mês do ano.



Fonte: ITU-R P.530-17 (2017).

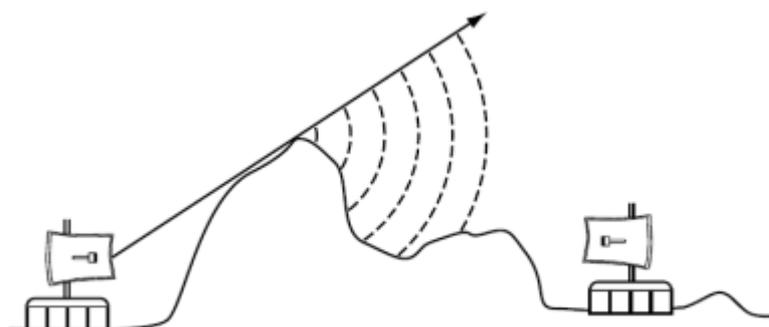
2.3.2 Difração

Segundo Rappaport (2008) a difração é o fenômeno que permite que os sinais de rádio se propaguem por trás de obstruções.

Acontece quando há um bloqueio opaco com dimensões muito maiores que o comprimento de onda do sinal. A difração ocorre nas bordas do obstáculo onde as ondas são espalhadas e há uma atenuação. Esse mecanismo permite a recepção do sinal quando a condição de visada direta não é satisfeita (FELICE, 2005).

Esse fenômeno tem extrema importância ao observar como o perfil de terreno influencia em projetos de radioenlaces e será melhor explanada na seção do capítulo referente aos perfis de terreno. A Figura 9 ilustra o fenômeno de difração em um enlace ponto a ponto.

Figura 9 – Difração em um enlace.



Fonte: BARROS JÚNIOR (2017).

2.3.3 Reflexão

A reflexão ocorre quando a onda de rádio atinge uma região que separa dois meios e retorna com a mesma velocidade de propagação e frequência da onda de origem (BARROS JÚNIOR, 2017).

Na Seção 2.3.1 foi explicado a Lei de Snell. Como visto, quando a onda incide em um meio com índice de refração diferente, parte da onda é refletida retornando para o meio inicial, é responsável pelas atenuações de multipercursos.

Um problema a se destacar, que é ocasionado por esse fenômeno, é o atraso entre o sinal que é transmitido diretamente entre Tx e Rx e o sinal que é refletido de alguma superfície. O atraso causa interferência altamente prejudicial para a comunicação das estações (ONGARATO, 2009).

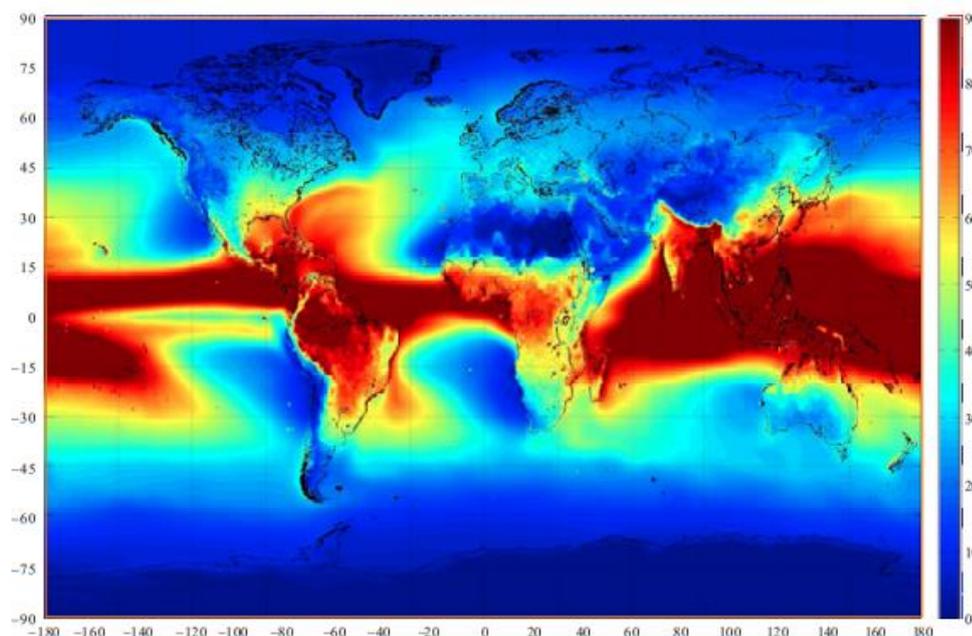
2.3.4 Atenuação Devido à Chuva

A atenuação devido à chuva está ligada diretamente à frequência. Esse tipo de atenuação é mais preocupante em enlaces que utilizam frequências maiores que 5 GHz, ou seja, em enlaces longos (PIAU, 2013).

Para mensurar a atenuação causada pela chuva o principal parâmetro a ser considerado é a taxa pluviométrica. Para definir esses parâmetros a ITU mapeou as taxas pluviométricas, e disponibiliza os parâmetros no documento ITU-R PN 837-3 (2017).

A Figura 10 apresenta a distribuição mundial da taxa pluviométrica a 0,01% do tempo, disposta na forma de mapa de calor. Através da imagem é capaz de definir valores de precipitação, mas para a obtenção de dados mais precisos é necessário consultar os órgãos de serviços meteorológicos que fornecem os dados das médias anuais específicas de uma cidade ou região, a exemplo o Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE).

Figura 10 – Distribuição mundial da taxa pluviométrica a 0,01% do tempo.



Fonte: ITU-R PN.837-7 (2017).

No Brasil os dados para as taxas precipitação pluviométrica excedidas em 0,01% do tempo estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela das taxas pluviométricas excedidas em 0,01% do tempo por região do Brasil.

Região do Brasil	N
Norte	80 – 110 mm/h
Nordeste	40 – 70 mm/h
Centro-Oeste	60 – 80 mm/h
Sudeste	60 – 80 mm/h
Sul	50 – 70 mm/h

Fonte: ROCHA *et. al* (2014).

O cálculo da atenuação é descrito na ITU-R P.838-3 através da equação:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (19)$$

γ_R : Atenuação específica;

k : Fator para correção da frequência;

R : Taxa pluviométrica;

α : Coeficiente para correção da frequência.

Deve-se levar em consideração também a polarização, resultando em duas equações, que são variações da equação 19. O fator para correção de frequência e o coeficiente para a

correção de frequência são diferentes na vertical e horizontal, sendo diferenciados pelo parâmetro v , no caso de ser vertical, e h , no caso de horizontal.

Polarização vertical:

$$\gamma_R = k_v R^{\alpha v} \quad (19.1)$$

Polarização horizontal:

$$\gamma_R = k_h R^{\alpha h} \quad (19.2)$$

Para obtenção dos parâmetros verticais e horizontais há uma tabela disponibilizada na ITU-R P.838-3, representada na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes para determinação da atenuação específica da chuva.

Frequência (GHz)	k_h	αh	k_v	αv
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129

Fonte: Adaptado ITU-R P.838-3 (2005).

Para determinação dos coeficientes para determinação da atenuação específica para frequências não tabeladas é utilizada interpolação linear para o coeficiente α e interpolação logarítmica para o coeficiente k .

2.3.5 Atenuações da Atmosfera

A ITU-R P. 530-17(2017) indica que as atenuações devido aos gases da atmosfera devem ser consideradas em enlaces que operam acima de 10 GHz.

A atenuação aumenta proporcionalmente com o aumento da frequência, especialmente em ângulos baixos (GALA, 2019).

2.4 Perfil de Terreno

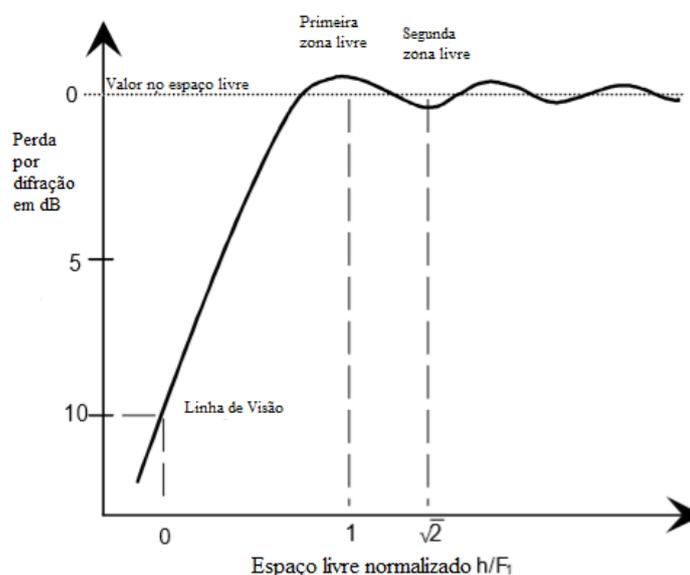
Os perfis de terreno são importantes para definir a melhor localização e também a altura que as antenas precisam ser instaladas. Considerar o perfil impede reflexões e também garante a visada direta entre as antenas (HENNE, 1999).

Como dito na Seção 2.3.2 a difração deve ser observada criteriosamente na análise de perfil de terreno. A difração também está intimamente ligada ao fator K, quanto menor o fator K maior será o efeito de difração (ONGARATO, 2009).

Ao projetar um enlace é necessário observar o perfil de terreno do caminho que a onda será transmitida. Existem alguns *softwares* que geram esse perfil, por exemplo *Pathloss*. Devido as alterações de terreno o fator K varia, essa variação pode modificar a curvatura das ondas transmitidas, fazendo com que elas possam se encontrar com obstáculos gerando difração. Existe uma zona chamada zona de Fresnel em que o curso deve seguir essa zona para evitar que perdas por difração sejam adicionadas as perdas do espaço livre.

A Figura 11 mostra as perdas por difração que são esperadas:

Figura 11 – Perda adicional por difração.

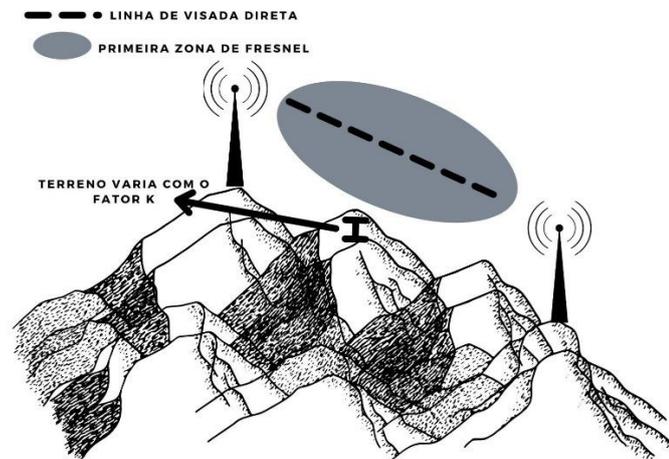


Fonte: HENNE (1999).

2.4.1 Zona de Fresnel

Segundo Piau (2014) a zona de Fresnel é definida como “energia do sinal irradiado é distribuída no espaço em torno da linha de visada direta” (apud CASTRO, 2010) A Figura 12 mostra a linha de visada direta no perfil do terreno.

Figura 12 – Perfil de Terreno.



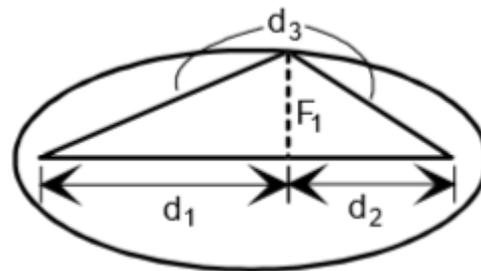
Fonte: Adaptado de HENNE (1999).

A primeira zona de Fresnel é definida através do ponto descrito por:

$$d_3 - (d_1 + d_2) = \frac{\lambda}{2} \quad (20)$$

λ define o comprimento de onda. Para a compreensão dos parâmetros presentes na equação é necessário visualizar que esta descreve uma elipse, e os parâmetros estão presentes na Figura 13:

Figura 13 – Elipse que descreve a primeira zona de Fresnel.



Fonte: HENNE (1999).

Na prática o raio F_1 é calculado através da equação 21:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad (21)$$

f é a frequência em GHz e $d = d_1 + d_2$.

2.4.2 Reflexões no caminho

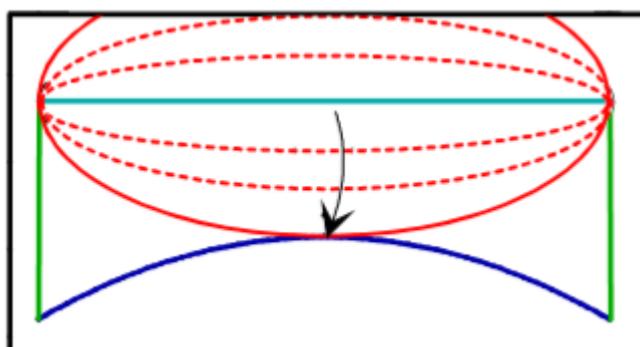
Outro fator importante a ser considerado ao estudar o caminho percorrido é a reflexão, estudada na Seção 2.3.3. De acordo com o que é refletido nas superfícies presentes no caminho que vão gerar um atraso na recepção do sinal é possível chegar na melhor separação entre as antenas. Essa separação pode ser obtida ou pelo método geométrico usando as zonas de Fresnel ou pelo método analítico.

2.4.2.1 Método Geométrico utilizando zonas de Fresnel

A partir desse método para encontrar a melhor separação entre as antenas utiliza-se o ponto de reflexão para separação horizontal e o método gráfico para separação vertical.

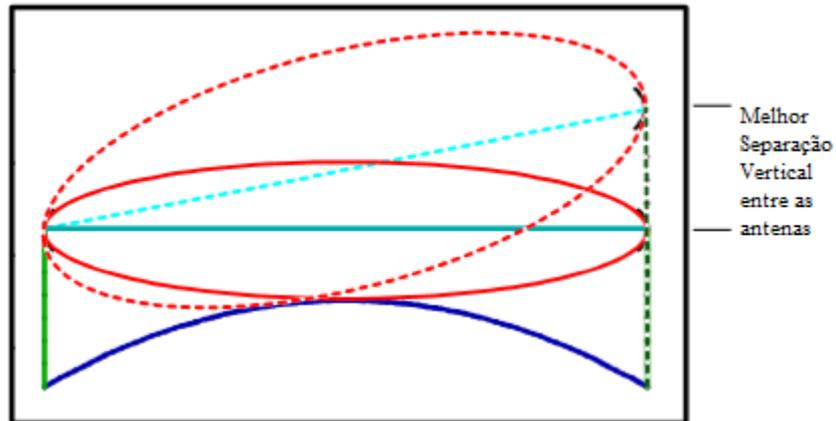
Quando o terreno se iguala a um ponto tangente de uma elipse o ponto de reflexão é encontrado. Esse ponto deve ser encontrado através da elipse formada pela zona de Fresnel até que essa toque no terreno. Deve-se então aumentar a elipse da zona de Fresnel para o valor correspondente de quando é aumentado ou diminuído meio comprimento de onda. Reposicionado a nova elipse para que ela fique tangente ao terreno tem-se uma diferença de altura entre essas antenas, essa é a separação ótima vertical (HENNE, 1999). A Figura 14 mostra a separação das antenas a partir do ponto de reflexão e a Figura 15 mostra a separação ótima vertical entre as antenas após ser aplicado o método geométrico com as zonas de Fresnel.

Figura 14 – Ponto de reflexão.



Fonte: HENNE (1999).

Figura 15 – Melhor separação entre as antenas.



Fonte: HENNE (1999).

2.4.2.2 Método Analítico

Segundo Henne (1999) é possível encontrar a melhor separação entre as antenas utilizando as seguintes equações:

$$q = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \quad (22)$$

q : Parâmetro para ser aplicado em equações subsequentes;

h_1 : Altura da antena 1 acima do ponto de reflexão no ponto A em m;

h_2 : Altura da antena 2 acima do ponto de reflexão no ponto B em m.

$$Q = \frac{k \cdot 51(h_1 + h_2)}{2 \cdot d^2} \quad (23)$$

Q : Parâmetro para ser aplicado em equações subsequentes;

k : fator K;

d : Percurso total em km.

$$V = \frac{q}{1 + \frac{1}{Q}} \quad (24)$$

V : Parâmetro para ser aplicado em equações subsequentes.

$$Z = V \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{V^{2i}}{(1 + Q)^i} \quad (25)$$

Como esse somatório converge rapidamente utilizar até o quarto termo já resulta em uma boa aproximação.

$$Z \approx V \left(1 + \frac{V^2}{1 + Q} + 3 \frac{V^4}{(1 + Q)^2} + 12 \frac{V^6}{(1 + Q)^3} \right) \quad (26)$$

$$d_1 = \frac{d}{2}(1 + Z) \quad (27-a)$$

$$d_2 = \frac{d}{2}(1 - Z) = d - d_1 \quad (27-b)$$

d_1 : Distância do ponto A até o ponto de reflexão;

d_2 : Distância do ponto B até o ponto de reflexão.

A diferença no comprimento do caminho e o sinal refletido estão expressos nas seguintes equações:

$$\delta = \frac{2}{d} \left(h_1 - \frac{d_1^2}{12,74 \cdot k} \right) \left(h_2 - \frac{d_2^2}{12,74 \cdot k} \right) \cdot 10^{-3} \quad (28)$$

$$\tau = \frac{\delta \cdot f}{0,3} \quad (29)$$

O afastamento indicado na Figura 13 é:

$$v_1 = \frac{0,3 \cdot d}{2 \cdot f} \cdot \frac{1}{h_2 - \frac{d_2^2}{12,74 \cdot k}} \cdot 10^3 \quad (30-a)$$

$$v_1 = \frac{0,3 \cdot d}{2 \cdot f} \cdot \frac{1}{h_1 - \frac{d_1^2}{12,74 \cdot k}} \cdot 10^3 \quad (30-b)$$

A melhor separação vertical das antenas é dada por:

$$\Delta h_{1(2)} = \frac{v_{1(2)}}{2} \quad (31)$$

3 SISTEMA AÉREO

O sistema aéreo é o sistema físico existente no projeto de um rádio enlace, engloba os equipamentos utilizados para implementação do sistema, torres, antenas, guias de onda, conectores, sistemas de pressurização, sistemas de energia e sistemas de aterramento.

3.1 Antenas

Antena é o dispositivo que está entre o espaço livre e o guia de onda, que tem a função de receber ou irradiar as ondas de rádio (BALANIS, 1997). De acordo com a definição é possível perceber que a função da antena não é gerar o sinal, mas sim transmiti-lo desde o gerador do sinal até o meio de propagação ou então do meio de propagação até o receptor do sinal.

3.1.1 Parâmetros principais das antenas

A característica básica da antena é a largura de banda, que é a faixa de frequência que a mesma opera de maneira satisfatória dentro dos padrões exigidos pela legislação vigente (ONGARATO, 2009).

Os parâmetros que devem ser compreendidos para entender o funcionamento do sistema e a empregabilidade do sistema são: Ganho; Relação Frente Costa; *Voltage standing wave ratio* (VSWR); Polarização; Ângulo de meia potência; e Estabilidade Mecânica.

3.1.1.1 Ganho

O ganho está diretamente ligado a diretividade. A diretividade é a relação entre intensidade de radiação em uma determinada direção, e a intensidade de radiação que seria obtida se a potência aceita pela antena fosse irradiada isotropicamente. A intensidade de radiação correspondente a potência isotropicamente irradiada. Diretividade é igual a potência de entrada da antena dividido por 4π (BALANIS, 1997). A definição é expressa pela equação 32:

$$D = 4\pi \frac{U}{P_{in}} \quad (32)$$

D : Diretividade;

U : Intensidade de radiação;

P_{in} : Potência de entrada.

Caso não haja perdas internas o ganho é igual a diretividade. No caso de perdas, essas devem ser descontadas.

Na equação 32 o ganho é adimensional. Normalmente antenas de micro-ondas são especificadas em dBi. O ganho então é expresso como uma razão entre a densidade de potência de uma fonte de radiação isotrópica e a densidade de potência em uma direção específica (MANNING, 2009). O ganho em dBi é expresso na equação 33:

$$dBi = 10 \log_{10}(P/P_{in}) \quad (33)$$

P : Densidade de potência em uma direção específica.

Nas antenas de micro-ondas o ganho também depende da abertura da antena, é expresso na equação 34:

$$G(\text{dBi}) = 10 \log\left(\eta \cdot A \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2}\right) \quad (34)$$

η : Eficiência de abertura (usualmente entre 0,5 e 0,6);

A : Abertura da antena em metros quadrados;

λ : Comprimento de onda em metros.

A equação 34 pode ser reescrita utilizando o diâmetro e a frequência. Assumindo uma eficiência de abertura de 0,55, temos a equação 35:

$$G(\text{dBi}) = 17,8 + 20 \log(D \cdot f) \quad (35)$$

D : Diâmetro da antena em metros;

f : Frequência em GHz.

3.1.1.2 Relação Frente Costa

Esse parâmetro é também representado pela sigla F/B, devido a sua nomenclatura em inglês *front to back ratio*. Uma antena não irradia sinal apenas na direção desejada. Ao transmitir o sinal parte da potência tem direção oposta em 180° a que se planeja que o sistema irradie. Segundo Manning (2009) a relação frente costa é definida como a razão do ganho na direção desejada com o ganho na direção das costas da antena.

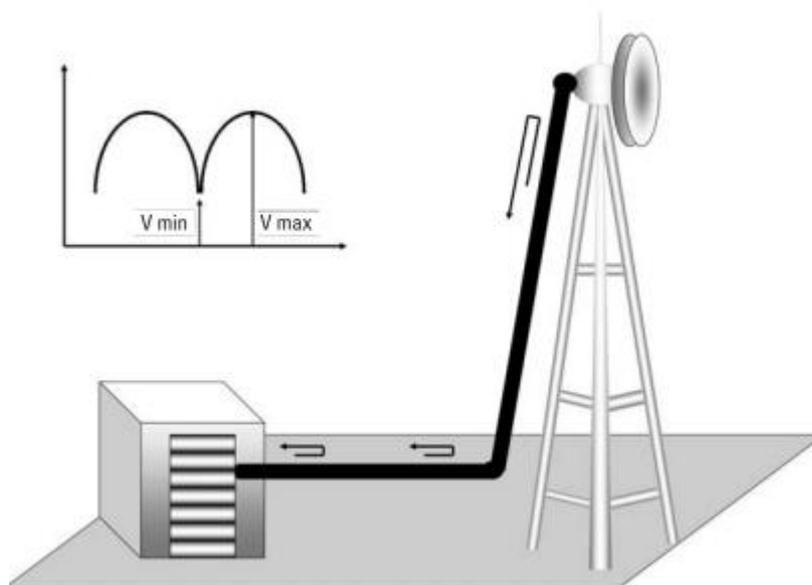
Quanto menor for essa relação mais eficiente é essa antena. Esse parâmetro tende a ser maior quanto maior for a frequência e também quanto maior for o diâmetro da antena utilizada (HENNE, 1999).

Sistemas de radioenlace devem ter antenas com uma boa relação frente costa de preferência com valores acima de 70 dB.

3.1.1.3 VSWR

Voltage standing wave ratio conhecido pela sigla VSWR também conhecido como perda por retorno. Esse parâmetro indica a quantidade de sinal que é refletida de volta ao transmissor em um circuito de RF. O sistema de alimentação apresenta uma impedância complexa que deve ser conectada com a antena. Idealizando um sistema perfeito essa impedância é casada com a da antena sendo assim toda potência gerada no sistema é transferida para o meio, mas ao analisar um sistema real o casamento de impedâncias não é perfeito fazendo com que parte da potência gerada seja refletida pelo cabo de transmissão (MANNING, 2009). A Figura 16 ilustra como acontece o VSWR.

Figura 16 – Esquematização do VSWR.



Fonte: MANNING (2009).

O VSWR então é obtido através da razão entre a tensão na situação do casamento perfeito de impedâncias e a tensão na situação real, sendo expressa na equação 36:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (36)$$

O VSWR sempre será maior que a unidade e quanto mais o valor se aproximar de 1 melhor será o sistema.

3.1.1.4 Polarização

Segundo Balanis (1997) a polarização de uma antena é dada de acordo com a polarização da onda propagada pela antena, quando a direção não é estabelecida a polarização adotada é a da direção de ganho máximo. A polarização da onda já foi definida no Capítulo 2 definindo em polarização vertical, quando o campo é perpendicular à superfície da terra, ou horizontal, quando é paralelo com a superfície da Terra.

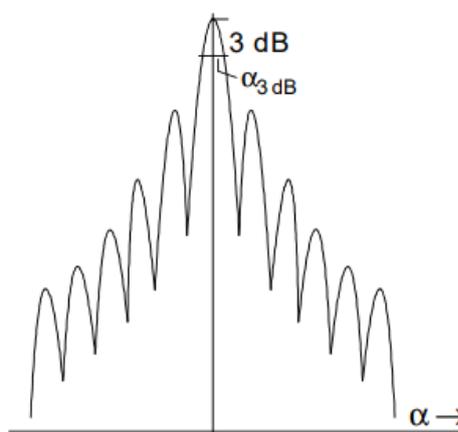
As antenas parabólicas, usadas em projetos de rotas de micro-ondas possuem polarização linear, em que ela pode ser tanto vertical, quanto horizontal. A polarização é definida então de acordo com a rotação do alimentador. Em um enlace a maior eficiência acontece quando ambas as antenas do sistema possuem a mesma polarização (ONGARATO, 2009).

3.1.1.5 Ângulo de meia potência

Esse é o ângulo que o sinal transmitido cai 3 dB em relação ao ângulo de máxima potência (HENNE, 1999).

Ao analisar o modelo de radiação da antena temos o lobo de irradiação principal, observa-se a partir desse o ângulo que a potência caiu 3 dB, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Modelagem da antena.



Fonte: HENNE (1999).

O ângulo de meia potência em graus é expressado na equação 37:

$$\alpha_{3dB} = \pm 35 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (37)$$

Existe outro ângulo importante que é o ângulo de deflexão de 10dBm indicado na equação 39:

$$\alpha_{10dB} = 60 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (38)$$

3.1.1.6 Estabilidade Mecânica

Esse parâmetro se referem as características físicas do sistema, no que diz respeito a rotação da antena no aparato que vai sustenta-la, esses fatores podem ocasionar até em 10 dB de atenuação de sinal, devido a um desalinhamento das antenas. Através da equação 38 é possível dizer qual o maior ângulo de desalinhamento que o sistema suportará (HENNE, 1999).

Além da estabilidade mecânica também é necessário observar outros fatores, como área de exposição ao vento, as dimensões físicas e o peso. Esses fatores no projeto são considerados no momento que a torre é dimensionada (ONGARATO, 2009).

3.1.2 Tipos de Antenas

A maioria dos sistemas de radioenlace utilizam antenas parabólicas, mas também existem outros tipos, como antenas Yagi, antenas refletoras de canto e antenas de painel plano, utilizados em frequências mais baixas.

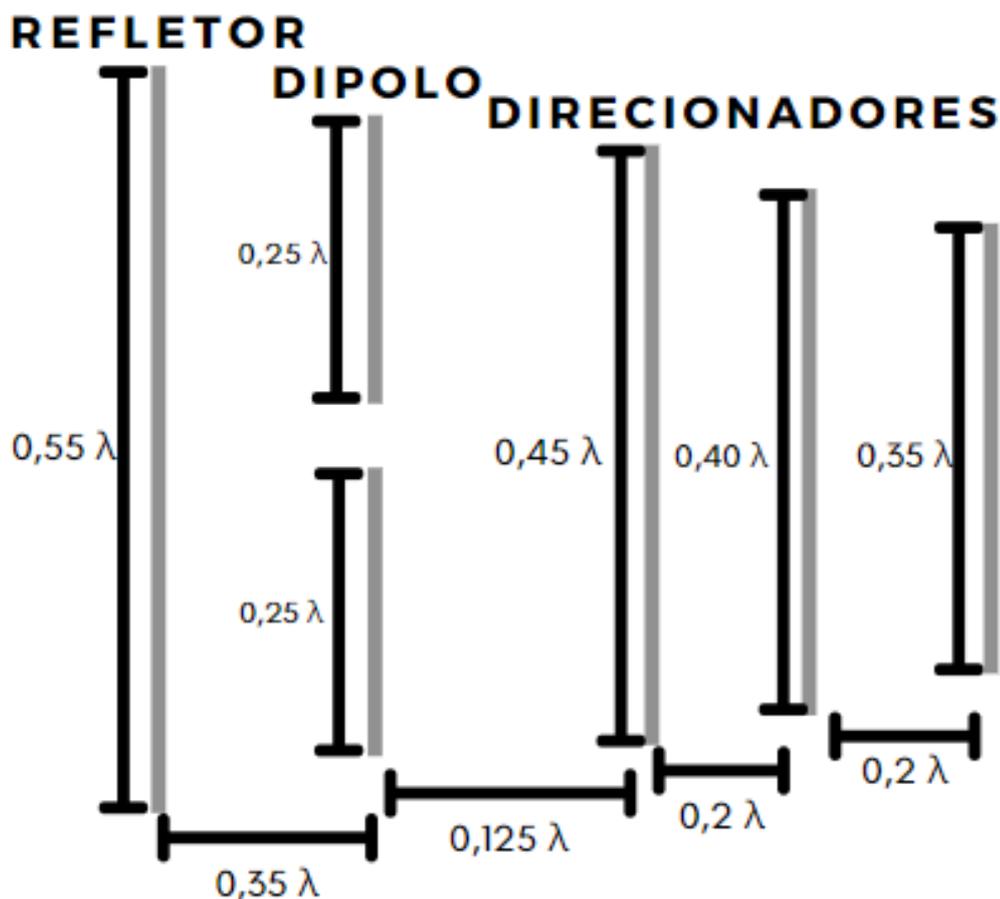
3.1.2.1 Antena Yagi

A antena Yagi é um arranjo de dipolos. Apenas um desses dipolos é alimentado pelo gerador do sinal. O dipolo posicionado atrás do dipolo alimentado é um refletor de sinal e ao longo da antena, paralelamente são posicionados dipolos passivos em um intervalo específico, definido pelo comprimento de onda, que servem para gerar o ganho (MANNING, 2009).

O esquema de construção da antena está expresso na Figura 18. Nesse tipo de antena estima-se o ganho multiplicando o número de direcionadores por 1,66.

Essas antenas são fáceis de instalar e operar, isso faz com que sejam utilizadas em enlaces internos.

Figura 18 – Esquemático da Antena Yagi.



Fonte: Adaptado de Matias (2019).

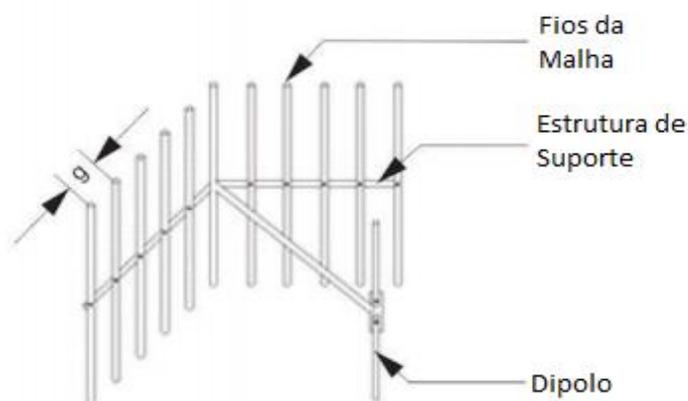
3.1.2.2 Antenas refletoras de canto

Essas antenas apresentam elevado ganho e alta relação frente costa. Podem ser configuradas com duas placas condutoras planas em intersecção ou ainda com dipolos como elementos de alimentação. Quando são utilizados dipolos, esses devem estar separados em uma fração do comprimento de onda, normalmente $g \leq \lambda/10$. O ângulo de abertura é entre as placas ou entre os dipolos é definida entre um e dois comprimentos de onda (RAMOS, 2016).

Enlaces de TV digital são um exemplo de utilização dessa antena.

A Figura 19 ilustra uma antena refletora de canto.

Figura 19 - Antena refletora de canto em configuração de malha de fios.



Fonte: RAMOS (2016).

3.1.2.3 Antenas de Painel Plano

Essas antenas são construídas a partir de um arranjo eletrônico feito em uma placa plana e as configurações eletrônicas que configuram o feixe de propagação. Ao analisar antenas desse tipo elas possuem um ganho adequado, considerando o tamanho reduzido, mas é difícil estabelecer uma boa relação frente costa (MANNING, 2009)

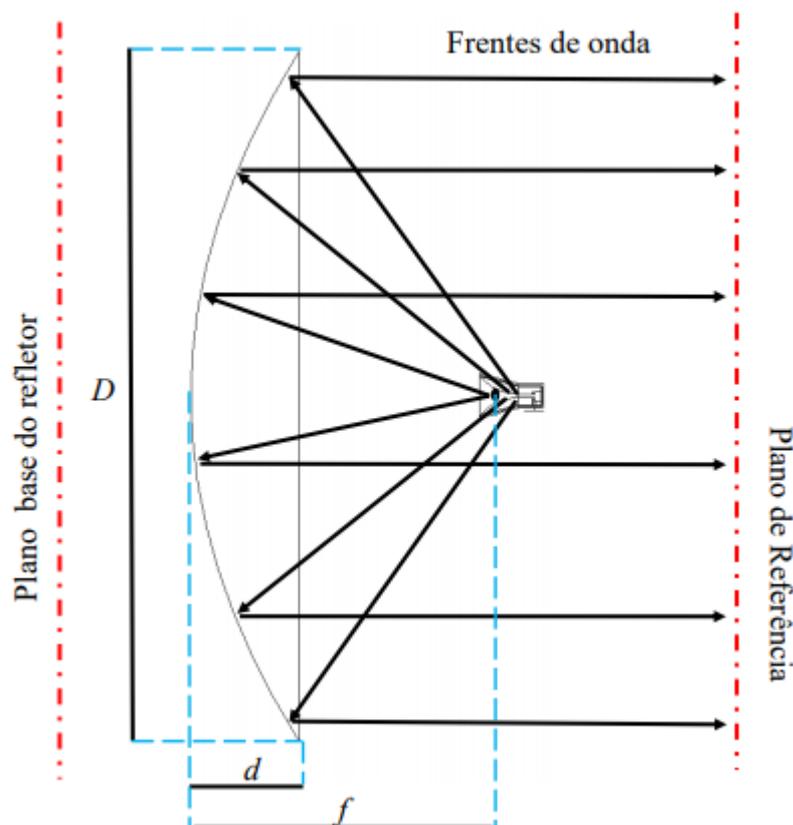
A utilização dessas antenas é feita geralmente na frente de construções, quando se quer preservar a arquitetura ou por qualquer outro motivo usar antenas de menores dimensões.

3.1.2.4 Antenas Parabólicas

As antenas parabólicas são as mais utilizadas em enlaces ponto a ponto.

O funcionamento de uma antena desse tipo é baseado através de uma onda esférica, irradiada por um alimentador, que ao ser refletida no refletidor parabólico se transforma em uma frente de onda plana que se desloca em um mesmo caminho retilíneo paralelo. O ganho dessas antenas é alto, ele é garantido pela sua capacidade de mirar o feixe de radiação à sua concavidade (BRANDÃO, 2019).

Figura 20 – Princípio de uma antena parabólica excitada pelo foco.



Fonte: BRANDÃO (2019)

Na Figura 20 o refletor é alimentado por uma antena corneta. Como visualizado através das setas, a onda gerada pelo alimentador incide no refletor e se propaga como uma frente de onda plana. D indica o tamanho do refletor, d a profundidade dele e f a distância focal.

Quanto maior a frequência a ser operada, melhor deve ser o material e a construção. Na prática o tipo de refletor a ser usado é definido pela banda de frequência a ser operado no sistema. Os principais grandes grupos são antenas de grade, que operam em frequências menores, geralmente menores que 2,5 GHz, e antenas sólidas. De acordo com o que se quer melhorar, seja ganho, F/B, abertura ou ângulo de meia potência então devem ser usadas antenas com um refletor que melhore esses parâmetros (MANNING, 2009).

3.2 Torres

No dimensionamento de um enlace tanto o método de construção como a localização das torres dependem da análise dos perfis de enlaces. Para que elas sejam dimensionadas corretamente é necessário fazer um estudo de carga que considere todas as antenas e equipamentos que se apoiarão nessa estrutura. Os parâmetros que devem ter mais atenção é a carga suportada e o ângulo de deflexão, que é o ângulo máximo de deflexão da torre (ONGARATO, 2009).

As torres devem ser equipadas com para-raios, sistema de aterramento, plataformas de trabalho, escada com guarda corpo e balizamento.

3.2.1 Torres Tubulares

As torres tubulares são mais baixas, entre 30 m e 40 m. Esse tipo de estrutura suporta menos antenas que os outros tipos de estruturas. O ângulo de deflexão é alto fazendo com que sistemas de alta precisão não sejam instalados nessas torres. A Figura 21 apresenta uma torre tubular.

Figura 21 – Torre tubular.

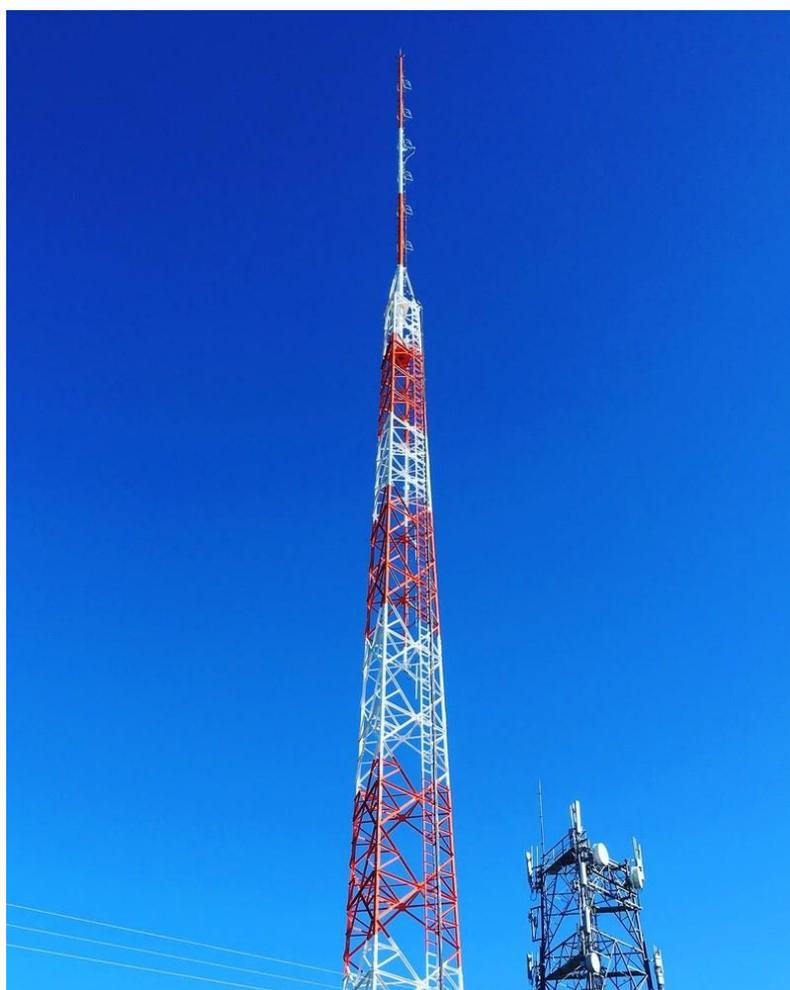


Fonte: Seccional.

3.2.2 Torres Autoportantes

Essas torres são utilizadas em sistemas que necessitam de grandes alturas. Essas torres também suportam a instalação de muitas antenas. São mais caras em relação as demais, mas apresentam vantagens como uma menor ocupação do terreno e também grande capacidade de carga, facilitando a instalação de equipamentos. A Figura 22 apresenta uma torre autoportante

Figura 22 – Torre Autoportante.



Fonte: Montasul.

3.2.3 Torres Estaiadas

Essas estruturas são parecidas com as autoportantes. Tem a vantagem de ser mais barata, mas também é necessário mais espaço para a instalação devido a necessidade de estaios e também sua capacidade de carga é menor em comparação as autoportantes. A Figura 23 apresenta uma torre estaiada.

Figura 23 – Torre Estaiada.



Fonte: Montasul.

3.3 Conectores e guias de onda

Segundo a resolução nº 399, de 15 de abril de 2005, da Anatel a definição para conectores é que esses são componentes usualmente aplicados a um cabo (excluindo adaptador) para unir eletricamente partes de uma linha de sistema de transmissão. Os mais comuns para RF são conectores com impedância de 50Ω e 75Ω . Para efeitos de cálculo a perda associada a cada conector é de 0,5 dB.

Guias de onda são elementos responsáveis por transmitir o sinal, com suas características de geração, através de um meio físico de um ponto a outro. Sua atenuação é dada pelo fabricante.

4 CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE DO ENLACE

Para implementar um radioenlace é necessário executar o plano de frequência, o cálculo de desempenho e disponibilidade e o cálculo de Interferência. A execução das etapas citadas depende de procedimentos tais como a observação dos enlaces já existentes na rota, obtenção das frequências listadas pela Anatel, parâmetros dos equipamentos utilizados, clima e topografia da região.

Antes de começar as etapas de realização do projeto são definidas a localização das estações e selecionadas as faixas de frequência. A localização das antenas deve respeitar a geografia do terreno observando os obstáculos existentes entre os pontos para que se estabeleça visada direta.

Este capítulo abordará a descrição da elaboração do plano de frequência e detalhará o cálculo da disponibilidade do enlace e interferência.

4.1 Elaboração do Plano de Frequência

O plano de frequência é realizado em duas etapas, o plano preliminar e o plano definitivo. O plano preliminar é feito pela análise da topologia da rede, com todos os enlaces existentes na região, através de consulta no SitarWeb/STEL. O plano definitivo é elaborado a partir do plano preliminar com a realização de cálculos de desempenho e interferências (SILVA, 2003).

Regiões metropolitanas costumam ter um número de enlaces elevado. Nessas regiões enlaces com frequências mais altas, acima de 15 GHz é indicado que sejam selecionados pares de frequências menos utilizados (SILVA, 2003).

A escolha dos pares de frequência segue os seguintes critérios: em cada estação do enlace deve ser escolhida uma subfaixa. Se houver na mesma estação dois ou mais enlaces com a mesma faixa de frequência estes devem operar na mesma subfaixa.

A elaboração do plano de frequência segue os seguintes critérios para as configurações descritas:

- Configuração (1+0) ou (1+1) hot standby;

É utilizado um par de frequências por direção, com os seguintes valores:

- Ângulos menores que 30 graus: Canal de separação e polarização trocada com relação ao enlace adjacente;

- Ângulos entre 30 e 120 graus: Canal de separação ou polarização trocada com relação ao enlace adjacente.

Caso o ângulo seja maior que 120 graus, pode-se utilizar co-canal e co-polarização cruzada (SILVA, 2003).

- Configuração (n+1) em estações críticas (muitas direções):

Em uma configuração com enlaces em diversas direções, normalmente o critério de escolha é o maior afastamento da frequência e polarização em relação ao enlace que forma o menor ângulo com o enlace a ser inserido. Caso a rota seja praticamente retilínea com ângulos próximos de 180° podem ser utilizadas as mesmas frequências e polarizações sem grandes interferências.

4.2 Cálculo da atenuação

A ITU-R P. 530 (2017) destaca alguns efeitos que devem ser considerados no desenho de projetos de enlaces com visada direta. São eles: Difração devido a obstruções no caminho pelo perfil do terreno, atenuação devido a gases atmosféricos, efeitos de multicaminho atmosférico ou espalhamento de feixe, reflexão de superfície, atenuação devido às chuvas, variação do ângulo de chegada devido a refração, redução na discriminação devido a polarização cruzada (XPD) e distorção de sinal devido ao desvanecimento na seleção de frequência e atraso devido a propagação multicaminho.

Como os fenômenos atmosféricos responsáveis pelas perdas em um radioenlace foram explicados no Capítulo 2, este capítulo focará na descrição dos cálculos apresentados na recomendação e também em outras literaturas.

4.2.1 Atenuação no espaço livre (A_e)

A atenuação no espaço livre é a atenuação que ocorre durante o trajeto de uma antena a outra, ela é diretamente proporcional à distância e a frequência, está descrita na equação 39 (SILVA, 2016).

$$A_e = 32,4 + 20 \cdot \log(f \cdot d) \quad (39)$$

f : Frequência em MHz;

d : Distância do enlace em quilômetros.

4.2.2 Atenuação pelos gases da atmosfera (A_a)

A ITU-R P. 530 (2017) trás a informação de que existe uma interferência devido a gases da atmosfera e vapor de água, porém as perdas são consideráveis quando a frequência do enlace é maior que 10 GHz. A equação 40 descreve a atenuação devido aos gases da atmosfera em um caminho de distância d .

$$A_a = \gamma_a \cdot d \quad (40)$$

γ_a : Atenuação específica dos gases e vapor de água, em dB/km.

Para a obtenção de γ_a é necessário seguir a recomendação ITU-R P.576.

A atenuação devido aos gases da atmosfera depende principalmente de três fatores: frequência, temperatura e pressão da atmosfera (GALA, 2019).

A ITU-R P. 576 (2017) descreve a equação 41 para cálculo da atenuação específica dos gases e vapor de água.

$$\gamma_a = \gamma_0 \cdot \gamma_w = 0.1820f(N''_{\text{oxigênio}}(f) + N''_{\text{vapor de água}}(f)) \quad (41)$$

γ_0 : Atenuação devido ao ar seco, em dB/km;

γ_w : Atenuação devido ao vapor de água, em dB/km;

f : Frequência, em GHz;

$N''_{\text{oxigênio}}$: Parte imaginária do valor complexo da refratividade do oxigênio;

$N''_{\text{vapor de água}}$: Parte imaginária do valor complexo da refratividade do vapor de água;

A parte imaginária do valor complexo da refratividade é calculado através da equação 42 para oxigênio e 43 para vapor de água.

$$N''_{\text{oxigênio}} = \sum_{i(\text{oxigênio})} S_i F_i + N''_D(f) \quad (42)$$

$$N''_{\text{vapor de água}} = \sum_{i(\text{vapor de água})} S_i F_i \quad (43)$$

S_i : Força da i -ésima faixa de oxigenio ou vapor de água;

F_i : Fator de forma de faixa de oxigênio ou vapor de água;

$N''_D(f)$: Espectro contínuo do ar seco devido a absorção de nitrogênio induzido pela pressão e espectro de Debye.

A força da i -ésima faixa do oxigênio ou vapor de água é calculada pela equação 44 para oxigênio e 45 para vapor de água.

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] \quad (44)$$

$$S_i = b_1 \times 10^{-7} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1 - \theta)] \quad (45)$$

p : Pressão do ar, em hPa;

e : Pressão parcial do vapor de água, em hPa;

θ : $300/T$, sendo T a temperatura em Kelvin.

Para obter a pressão parcial do vapor de água é utilizada a equação 46.

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad (46)$$

ρ : Densidade do vapor de água.

O fator de forma de faixa de oxigênio ou vapor de água é calculado pela equação 47.

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (47)$$

f_i : Frequência da faixa de oxigênio ou vapor de água;

Δf : Largura da faixa de oxigênio ou vapor de água;

δ : Fator de correção das interferências causadas pelas faixas de oxigênio, essas interferências não são consideradas para o vapor de água.

Para calcular a largura da faixa de oxigênio ou vapor de água é aplicada a equação 48 para oxigênio e 49 para vapor de água.

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8-a_4)} + 1,1e\theta) \quad (48)$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \quad (49)$$

O fator de correção das interferências causadas pelas faixas de oxigênio é obtido através da equação 50.

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) + 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} \quad (50)$$

Os parâmetros $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ e b_6 são tabelados pela ITU-R P. 576.

Para calcular o espectro contínuo do ar seco devido a absorção de nitrogênio induzido pela pressão e espectro de Debye é aplicada a equação 51.

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d[1+(\frac{f}{d})^2]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1+1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right] \quad (51)$$

d : Parâmetro de largura para o espectro de Debye.

O parâmetro d é obtido através da equação 52.

$$d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} \quad (52)$$

Para enlaces de com frequência abaixo de 57 GHz os valores de γ_0 e γ_W podem ser encontrados aplicando as equações 53 e 54, respectivamente (SILVA, 2003).

$$\gamma_0 = (7,13 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,5}) \cdot f^2 \cdot 10^{-3} \quad (53)$$

$$\gamma_W = (0,05 + 0,021 \cdot \rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3}) \rho \cdot f^2 \cdot 10^{-4} \quad (54)$$

4.2.3 Atenuação devido às chuvas ($A_{0,01}$)

De acordo com a ITU-R P. 530 a atenuação devido as chuvas passa a ser significativa em sistemas com frequência de operação igual ou maiores que 5 GHz.

Para os climas tropicais e subtropicais, na faixa de SHF a atenuação que mais influencia no desempenho de enlaces de rádio são as gotas de chuva. As gotas de chuva atuam como um meio dielétrico imperfeito para o campo incidente, provocando absorção e espalhamento da energia, esse fenômeno se intensifica quanto mais próximo for o tamanho das gotas em comparação com o comprimento de onda (ROCHA, 2014).

Os parâmetros que mais influenciam na atenuação pela precipitação são a intensidade de precipitação excedida durante 0,01% do tempo, a frequência de operação do enlace, a distância do enlace, o tipo de polarização, caso seja linear ou circular, o ângulo de elevação do trajeto e o ângulo de inclinação da polarização com a horizontal e a porcentagem de tempo para calcular a atenuação (GALA, 2019).

Os dados meteorológicos necessários podem ser obtidos por algum centro de previsão meteorológica ou então utilizados os valores obtidos na ITU-R P. 837.

A atenuação devido às chuvas é obtida através da equação 55.

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{eff} \quad (55)$$

γ_R : Atenuação específica da chuva, em dB/km

d_{eff} : Distância efetiva do enlace.

A equação 55 descreve a equação da atenuação para 0,01% do tempo. Foi utilizado esse tempo, pois é o parâmetro utilizado no Brasil na execução de projetos.

A atenuação específica devido às chuvas depende fundamentalmente da intensidade de precipitação excedida durante 0,01% do tempo, sendo obtida aplicando a equação 56.

$$\gamma_{0,01} = k \cdot R_{0,01}^\alpha \quad (56)$$

A ITU-R P. 838.3 fornece as equações 57 e 58 para cálculo de k e α , respectivamente.

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log_{10} f + c_k \quad (57)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log_{10} f + c_k \quad (58)$$

f : Frequência em GHz;

A recomendação já fornece valores tabelados de k e α para polarização vertical ou horizontal como visto na Tabela 4. No caso de utilização de frequência não especificada na tabela da norma deve-se utilizar interpolação linear para obtenção de alfa e interpolação logarítmica para obtenção de k .

Caso a polarização utilizada no projeto seja linear ou circular a obtenção de k e α deve ser feita através da equação 59 e 60.

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \quad (59)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k \quad (60)$$

θ : Ângulo de elevação do caminho, em radianos;

τ : Ângulo de inclinação da polarização com a horizontal, em radianos.

Caso a polarização seja circular adota-se $\tau = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$.

A distância efetiva do enlace é obtida através da equação 61.

$$d_{eff} = d \cdot r \quad (61)$$

d : Distância efetiva do enlace;

r : Fator de distância.

Para calcular r aplica-se a equação 62.

$$r = \frac{1}{0,477 d^{0,633} R_{0,01}^{0,073 \alpha} f^{0,123} - 10,579 (1 - \exp(-0,024 d))} \quad (62)$$

O r máximo recomendado é 2,5, caso ao aplicar a equação r seja maior que 2,5 deve-se utilizar $r = 2,5$.

4.2.4 Atenuação por difração (A_d)

De acordo com o perfil de terreno e geografia do local pode haver obstáculos no caminho que ocasionem perdas. A ITU-R P. 526 descreve métodos para cálculo das perdas nesses trajetos. A ITU-R P 530 também fornece a equação 64 para cálculo das perdas por difração quando essas são maiores que 15 dB.

$$A_d = -\frac{20h}{F_1} + 10 \quad (63)$$

h : Diferença de altura entre o obstáculo mais significativo no caminho, em metros;

F_1 : Raio da primeira elipsoide de Fresnel.

F_1 é obtido através da equação 65.

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad (64)$$

d_1 e d_2 : Distância entre os terminais até a obstrução do caminho.

Segundo a ITU-R P. 530-17 em frequências acima de 2 GHz a atenuação por difração é mitigada instalando antenas suficientemente altas para evitar que atrapalhe na disponibilidade do enlace.

4.2.5 Atenuação dos circuitos de ramificação (A_{rmf})

A atenuação dos circuitos de ramificação diz respeito a perda ocasionada pelos equipamentos que compõem o sistema, desde a geração de sinal até a recepção (SILVA, 2016). O cálculo desse parâmetro depende das especificações do fabricante dos equipamentos utilizados e também da configuração do sistema, explicada na seção 4.1 desse capítulo, se pautando na quantidade de acopladores que podem ser inseridos nas antenas. Em suma a atenuação é obtida somando a perda híbrida do sistema de recepção e também a perda híbrida do sistema de transmissão.

4.2.6 Atenuação do guia de onda (A_c)

A atenuação do guia de onda, seja ele, cabo coaxial, fibra óptica, guia metálico ou outro, é descrita na equação 66.

$$A_c = \text{Perda no cabo por metro} \cdot L_c \quad (65)$$

L_c : Comprimento do cabo em metros.

Ao se calcular a atenuação do guia de onda deve-se observar a especificação do fabricante dos equipamentos para considerar apenas a atenuação que ultrapasse os limites do equipamento utilizado.

4.2.7 Atenuação total (A_t)

A atenuação total do sistema é o somatório das atenuações consideráveis ao sistema.

$$A_t = \sum A = A_e + A_a + A_{0,01} + A_{rmf} + A_c \quad (66)$$

4.2.8 Balanço de potência

O balanço de potência associa a o desempenho do radioenlace com as atenuações sofridas no percurso. Para cálculo do balanço de potência é levado em consideração os níveis de potência nos terminais das antenas do sistema, o ganho das antenas e as atenuações do sistema (ROCHA, 2014).

Aplica-se a equação 67 para o balanço de potência.

$$P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} = P_{Rx} + A_t \quad (67)$$

P_{Tx} : Potência da antena transmissora, em dBm;

P_{Rx} : Potência da antena receptora, em dBm;

G_{Tx} : Ganho da antena transmissora, em dBi;

G_{Rx} : Ganho da antena receptora, em dBi;

A_t : Atenuação total, em dB.

4.2.9 Nível de recepção nominal

O nível de recepção do sistema é calculado pela equação 46.

$$P_{RN} = P_{Tx} - A_t \quad (68)$$

P_{Tx} : Potência de transmissão do sistema;

A_t : Atenuação total líquida.

4.3 Cálculo da Disponibilidade

Através do cálculo da disponibilidade é obtida a porcentagem de tempo que o enlace pode ficar inoperante devido a desvanecimentos. A ITU-R P.530 descreve o passo a passo para cálculo da disponibilidade.

Primeiramente deve-se calcular o fator geoclimático K através da equação 69.

$$K = 10^{-4,6-0,0027 \times dN1} (10 + s_a)^{-0,46} \quad (69)$$

$dN1$: Refratividade excedida em 1% do tempo;

s_a : Rugosidade do solo na região do solo

A rugosidade do solo é obtida através de um mapa disponível no *site* da ITU-R grupo de estudos 3. A ITU-R P. 453-14 fornece a equação necessária para obtenção da refratividade. A equação 70 expressa a equação para obtenção da refratividade.

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (70)$$

T : Temperatura, em K;

P : Pressão atmosférica, em hPa;

e : Pressão de vapor de água, em hPa.

Então é necessário calcular a inclinação das antenas, dada em mil angular, obtida através da equação 71.

$$|\varepsilon_p| = \frac{|h_r - h_e|}{d} \quad (71)$$

h_r : Altura do caminho acima do mar, em m;

h_e : Altura das antenas, em m;

d : Distância do enlace, em km.

É preciso calcular o fator de ocorrência de múltiplos caminhos pela equação 72.

$$p_o(\%) = K \times d^{3,4} \times (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,03} \times f^{0,8} \times 10^{-0,00076 \times h_L - A_f/10} \quad (72)$$

h_L : Altura da antena mais baixa.

Na equação 72 o parâmetro A_f é a diferença entre a potência do sinal recebido e o nível de *threshold* do equipamento (SILVA, 2016).

O fator de ocorrência de múltiplos caminhos indica a porcentagem de tempo que o enlace estará disponível, logo para calcular a disponibilidade, em termos de porcentagem de tempo, do enlace aplica-se a equação 73.

$$D(\%) = 100 - p_w(\%) \quad (73)$$

4.4 Degradações por interferência

Um radioenlace pode sofrer algumas interferências prejudiciais ao sinal, que devem ser observadas para projetar um enlace viável. Essas interferências são divididas entre fixas e variáveis.

As interferências fixas são aquelas que se mantêm constantes independente da condição de propagação, fazendo com que as atenuações presentes no sistema também caiam sobre essa interferência. Na maioria das vezes a interferência fixa é desprezada no sistema (SILVA, 2003).

Existem também as interferências variáveis que variam de acordo com as condições de propagação, entre elas se destacam as seguintes.

4.4.1 Interferências do mesmo enlace

Em um sistema (n+1) são consideradas as interferências co-canal e de canal adjacente. Para a interferência de canal adjacente é adotado o valor de 10 dB, valor obtido através de medições em campo. A interferência co-canal é considerada de acordo com as especificações do fabricante, o valor prático adotado é de 20 dB (SILVA, 2003).

4.4.2 Interferências de canal adjacente

Essas interferências são causadas por outros sistemas. Entre elas se destacam o ruído ambiental, causado pelo ambiente que está localizado a antena, considerando a ignição de veículos, localização da torre, altura, tipo de antena. Outra interferência desse tipo é o ruído térmico. Para esse ruído no cálculo é considerado um valor alto, afim de não interferir o cálculo final do enlace (SILVA, 2003).

4.5 Margem do Enlace

A margem do enlace é calculada pela equação 74.

$$M_t = P_R - P_{RSES} \quad (74)$$

P_{RN} : Nível de recepção nominal;

P_{RSES} : Limiar de recepção do equipamento.

A margem bruta do enlace é um valor teórico considerando apenas o ruído térmico. A margem líquida, real. A margem líquida é representada pela sigla FFM, *flat fading margin*. Esse parâmetro determina a porcentagem de interrupção devido ao desvanecimento plano e na indisponibilidade devido as chuvas (SILVA, 2003). É representada pela equação 78.

$$FFM = M_t + D_t \quad (75)$$

D_t : Soma das degradações por interferência, fixa e variável.

5 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA

O programa elaborado tem o objetivo de calcular as perdas em um rádio enlace ponto a ponto, na faixa de SHF, 3 a 30 GHz e fornecer a margem do enlace. A linguagem escolhida para idealização do projeto foi Python.

A elaboração do programa foi feita com a criação de um arquivo para execução do programa e arquivos separados para definição de funções dos cálculos que serão realizados no programa.

Este capítulo irá apresentar a construção do código realizado.

5.1 Escolha da Linguagem

A linguagem escolhida foi Python. No *site* da linguagem existe a seguinte definição: “Python é poderosa... e rápida; se dá bem com todos; roda em todos os lugares; é amigável e fácil de aprender; é aberta” (Python, 2021). Dessa forma o *site* oficial classifica características inerentes a linguagem que são, ser de código aberto, com sintaxe simples e limpa, com uma grande quantidade de bibliotecas, multiplataforma e que se comunica com outras linguagens.

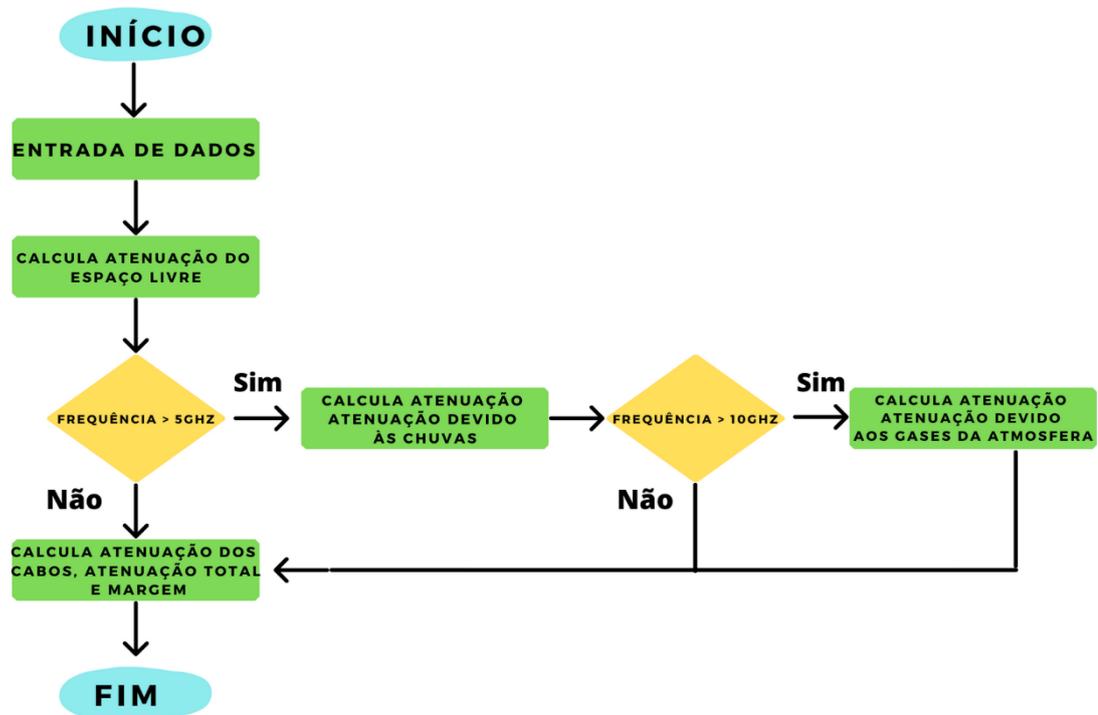
É possível destacar as seguintes características do Python, linguagem interpretada, fortemente tipada; multiplataforma; multiparadigma, suporta programação estruturada e orientada a objetos; e seu código é estruturado pela indentação, facilitando a leitura (GALA, 2019).

A simplicidade da linguagem e sua extensa gama de bibliotecas foram os principais fatores para escolha do Python.

5.2 Funcionamento do programa

O programa desenvolvido funciona através do recebimento de dados então são efetuadas decisões para que sejam calculadas as atenuações que influenciarão no projeto de acordo com a frequência de operação do sistema. Após a decisão sobre quais atenuações devem ser calculadas então são efetuados os cálculos e retornado ao usuário os valores numéricos correspondentes a cada valor de atenuação e margem. O diagrama de fluxo do programa está representado na Figura 24.

Figura 24 – Digrama de fluxo do programa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa é iniciado com a requisição dos seguintes dados de entrada:

- Frequência em GHz, como o programa é elaborado para a faixa de SHF é necessário que a frequência esteja entre 3 e 30 GHz;
- As coordenadas geográficas, no sistema decimal, das estações.
- Potência da antena transmissora, em dBm;
- O ganho da antena transmissora, em dBi;
- O ganho da antena receptora, em dBi;
- A intensidade de chuva excedida durante 0,01% do tempo, em mm/h;
- A potência de limiar de recepção dos equipamentos do sistema receptor, em dBm;
- A perda nos guias de onda, em dB/m;
- O comprimento dos cabos, em m;
- O tipo de polarização do sistema
- Densidade do vapor de água, em g/m^3 .

Após a entrada dos dados os cálculos são executados e retornam os seguintes parâmetros:

- Atenuação no espaço livre (A_e);
- Atenuação pelos gases da atmosfera (A_a);
- Atenuação devido às chuvas ($A_{0,01}$);
- Atenuação do guia de onda (A_c);
- Atenuação total do sistema (A_t);
- Nível de recepção do sistema (P_{Rx});
- Margem bruta do enlace (M_t);

5.3 Cálculo da distância

O cálculo da distância é feito através da equação de Haversine, equação responsável para o cálculo da distância entre dois pontos no globo através de suas coordenadas geográficas, indicada nas equações 76, 77 e 78.

$$a = \text{sen}^2(\Delta\varphi/2) + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \text{sen}^2(\Delta\theta/2) \quad (76)$$

$$c = 2 \cdot \text{sen}^{-1}(\sqrt{a}) \quad (77)$$

$$d = R \cdot c \quad (78)$$

φ : Latitude do ponto;

θ : Longitude do ponto;

R: Raio da Terra, R=6371 km.

O Quadro 1 apresenta o código para cálculo da distância.

Quadro 1 – Código para cálculo da distância entre dois pontos.

```

def dist(lat1, lng1, lat2, lng2):
    rad = math.pi / 180
    dlat = float(lat2) - float(lat1)
    dlng = float(lng2) - float(lng1)
    a = (math.sin(rad * dlat / 2)) ** 2 + math.cos(rad * float(lat1)) *
        math.cos(rad * float(lat2)) * (math.sin(rad * dlng / 2)) ** 2
    distancia = 2 * 6371 * math.asin(math.sqrt(a))
    return distancia

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi importada a biblioteca *math* para realização das operações matemáticas necessárias.

5.4 Funções para atenuação na atmosfera

As funções para cálculo dos parâmetros da atenuação da atmosfera foram realizados nessa pasta específica que definiu as funções de cálculo de A_e e A_a .

5.4.1 Atenuação do espaço livre: *at_espacolivre(freq, distenlace)*

A definição dessa função é a transcrição da equação 39. Os parâmetros *freq* e *distenlace*, são a frequência e a distância do enlace, parâmetros de entrada do programa.

O código escrito está representado no Quadro 2.

Quadro 2 – Código para cálculo da Atenuação no espaço livre.

```

def at_espacolivre(freq, distenlace):
    at_espaco_livre = 32.4 * 20 * math.log((freq/1000)*distenlace, 10)
    return at_espaco_livre

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O código do quadro faz uso da biblioteca *math*, a biblioteca matemática nativa do Python, utilizada para cálculo do logaritmo.

5.4.2 Atenuação pelos gases da atmosfera: *at_absorcao_atm(dist, freq, densidade_vapor)*

Essa função depende dos parâmetros de entrada frequência e distância do enlace e densidade do vapor de água. Como o objeto de estudo do trabalho são radioenlaces ponto a ponto na faixa de SHF, ou seja, abaixo de 57 GHz, o cálculo dos de atenuação do ar seco e do

ar úmido são calculadas aplicando as equações 53 e 54. Os valores obtidos então são aplicados na equação 40.

O código dessa função está transcrito no Quadro 3.

Quadro 3 – Código para cálculo da atenuação pelos gases no espaço livre.

```
def at_ absorcao_atm(dist, freq, densidade_vapor):
    at_seco = (7.19 * (10**(-3)) + (6.09/((freq**2)+0.227) +
        (4.81/(((freq-57)**2)+1.5)))) * freq**2 * (10**(-3))
    at_umido = (0.05 + (0.0021*densidade_vapor) + (3.6/(((freq-22.2)**2)+8.5)) +
        (10.6/(((freq - 183.3)**2)+9)) +
        (8.9/(((freq - 325.4)**2)+26.3))) * densidade_vapor * freq**2 * (10**(-4))
    atenuacao_absorcao_atm = (at_seco + at_umido) * dist
    return atenuacao_absorcao_atm
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Funções para atenuação devido às chuvas

A obtenção da atenuação devido às chuvas se dá através da equação 55. Para aplicação da equação é necessário obter os parâmetros k e α , obtidos de acordo com sua polarização já calculados e obtidos através da tabela da ITU-R P. 838-3. Os parâmetros são utilizados após a interpolação dos valores tabelados com o valor de entrada. Com a obtenção dos parâmetros k e α é calculada a atenuação específica da chuva, aplicando a equação 56. O próximo procedimento é a obtenção da distância efetiva do enlace, encontrada aplicando as equações 61, e a equação 62 para obtenção do parâmetro r . Após esse procedimento é aplicada a equação 55.

5.5.1 Coeficiente k

O coeficiente k é diferente para cada tipo de polarização o qual é definido através da tabela da ITU-R P. 838-3. Para obtenção de valores não tabelados aplica-se a interpolação logarítmica. A interpolação foi realizada utilizando a biblioteca *numpy* importada como *np*.

- k , polarização horizontal: *khorizontal(freq)*

O Quadro 4 demonstra a função para obtenção de k com polarização horizontal.

Quadro 4 – Código para obtenção de k com polarização horizontal.

```
def khorizontal(freq):
    frequencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
                  18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
                  38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
                  58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77,
                  78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]
    kh = [0.0000259, 0.0000443, 0.0000847, 0.0001321, 0.0001390, 0.0001155, 0.0001071,
          0.0001340, 0.0002162, 0.0003909, 0.0007056, 0.001915, 0.004115, 0.007535,
          0.01217, 0.01772, 0.02386, 0.03041, 0.03738, 0.04481, 0.05282, 0.06146, .07078,
          0.08084, 0.09164, 0.1032, 0.1155, 0.1286, 0.1425, 0.1571, 0.1724, 0.1884, 0.2051,
          0.2224, 0.2403, 0.2588, 0.2778, 0.2972, 0.3171, 0.3374, 0.3580, 0.3789, 0.4001,
          0.4215, 0.4431, 0.4647, 0.4865, 0.5084, 0.5302, 0.5521, 0.5738, 0.5956, 0.6172,
          0.6386, 0.6600, 0.6811, 0.7020, 0.7228, 0.7433, 0.7635, 0.7835, 0.8032, 0.8226,
          0.8418, 0.8606, 0.8791, 0.8974, 0.9153, 0.9328, 0.9501, 0.9670, 0.9836, 0.9999,
          1.0159, 1.0315, 1.0468, 1.0618, 1.0764, 1.0908, 1.1048, 1.1185, 1.1320, 1.1451,
          1.1579, 1.1704, 1.1827, 1.1946, 1.2063, 1.2177, 1.2289, 1.2398, 1.2504, 1.2607,
          1.2708, 1.2807, 1.2903, 1.2997, 1.3089, 1.3179, 1.3266, 1.3351, 1.3434, 1.3515,
          1.3594, 1.3671, 1.4866, 1.5823, 1.6378, 1.6286, 1.5860, 1.5418, 1.5013,
          1.4654, 1.4335, 1.4050, 1.3795]
    logfreq = np.log10(freq)
    logfrequencia = np.log10(frequencia)
    logkh = np.log10(kh)
    khinterp = np.power(10.0, np.interp(logfreq, logfrequencia, logkh))
    return khinterp
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

- k , polarização vertical: $k_{vertical}(freq)$

O Quadro 5 demonstra a função para obtenção de k com polarização vertical.

Quadro 5 – Código para obtenção de k com polarização vertical.

```
def kvertical(freq):
    frequencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
                  18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
                  38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
                  58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77,
                  78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]
    kv = [0.0000308, 0.0000574, 0.0000998, 0.0001464, 0.0001942, 0.0002346, 0.0002461,
          0.0002347, 0.0002428, 0.0003115, 0.0004878, 0.001425, 0.003450, 0.006691,
          0.01129, 0.01731, 0.02455, 0.03266, 0.04126, 0.05008, 0.05899, 0.06797,
          0.07708, 0.08642, 0.09611, 0.1063, 0.1170, 0.1284, 0.1404, 0.1533, 0.1669,
          0.1813, 0.1964, 0.2124, 0.2291, 0.2465, 0.2646, 0.2833, 0.3026, 0.3224, 0.3427,
          0.3633, 0.3844, 0.4058, 0.4274, 0.4492, 0.4712, 0.4932, 0.5153, 0.5375, 0.5596,
          0.5817, 0.6037, 0.6255, 0.6472, 0.6687, 0.6901, 0.7112, 0.7321, 0.7527, 0.7730,
          0.7931, 0.8129, 0.8324, 0.8515, 0.8704, 0.8889, 0.9071, 0.9250, 0.9425, 0.9598,
          0.9767, 0.9932, 1.0094, 1.0253, 1.0409, 1.0561, 1.0711, 1.0857, 1.1000, 1.1139,
          1.1276, 1.1410, 1.1541, 1.1668, 1.1793, 1.1915, 1.2034, 1.2151, 1.2265, 1.2376,
          1.2484, 1.2590, 1.2694, 1.2795, 1.2893, 1.2989, 1.3083, 1.3175, 1.3265, 1.3352,
          1.3437, 1.3520, 1.3601, 1.3680, 1.4911, 1.5896, 1.6443, 1.6286, 1.5820, 1.5366,
          1.4967, 1.4622, 1.4321, 1.4056, 1.3822]
    logfreq = np.log10(freq)
    logfrequencia = np.log10(frequencia)
    logkv = np.log10(kv)
    kvinterp = np.power(10.0, np.interp(logfreq, logfrequencia, logkv))
    return kvinterp
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

- k , polarização circular e linear: $k_{circular_e_linear}(kh, kv, angulo)$

O Quadro 6 demonstra a função para obtenção de k com polarização linear ou circular.

Quadro 6 – Código para obtenção de k com polarização linear ou circular.

```
def k_circular_e_linear(kh, kv, angulo):
    k = 1/2 * (kh + kv + ((kh - kv)*(math.cos(angulo)**2)))
    return k
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

É utilizada a biblioteca matemática *math* para cálculo do cosseno.

5.5.2 Coeficiente α

O coeficiente α é diferente para cada tipo de polarização e é definido através da tabela da ITU-R P. 838-3. Para obtenção de valores não tabelados aplica-se a interpolação linear. A interpolação foi realizada utilizando a biblioteca *numpy* importada como *np*.

- α , polarização horizontal: *alfahorizontal(freq)*

O Quadro 7 demonstra a função para obtenção de α com polarização horizontal.

Quadro 7 – Código para obtenção de α com polarização horizontal.

```
def alfahorizontal(freq):
    frecuencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
                  18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
                  38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
                  58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77,
                  78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]
    ah = [0.9691, 1.0185, 1.0664, 1.1209, 1.2322, 1.4189, 1.6009, 1.6948, 1.6969, 1.6499,
          1.5900, 1.4810, 1.3905, 1.3155, 1.2571, 1.2140, 1.1825, 1.1586, 1.1396, 1.1233,
          1.1086, 1.0949, 1.0818, 1.0691, 1.0568, 1.0447, 1.0329, 1.0214, 1.0101, 0.9991,
          0.9884, 0.9780, 0.9679, 0.9580, 0.9485, 0.9392, 0.9302, 0.9214, 0.9129,
          0.9047, 0.8967, 0.8890, 0.8816, 0.8743, 0.8673, 0.8605, 0.8539, 0.8476, 0.8414,
          0.8355, 0.8297, 0.8241, 0.8187, 0.8134, 0.8084, 0.8034, 0.7987, 0.7941, 0.7896,
          0.7853, 0.7811, 0.7771, 0.7731, 0.7693, 0.7656, 0.7621, 0.7586, 0.7552, 0.7520,
          0.7488, 0.7458, 0.7428, 0.7400, 0.7372, 0.7345, 0.7318, 0.7293, 0.7268,
          0.7244, 0.7221, 0.7199, 0.7177, 0.7156, 0.7135, 0.7115, 0.7096, 0.7077, 0.7058,
          0.7040, 0.7023, 0.7006, 0.6990, 0.6974, 0.6959, 0.6944, 0.6929, 0.6915, 0.6901,
          0.6888, 0.6875, 0.6862, 0.6850, 0.6838, 0.6826, 0.6815, 0.6640, 0.6494, 0.6382,
          0.6296, 0.6262, 0.6253, 0.6262, 0.6284, 0.6315, 0.6353, 0.6396]
    ahinterp = np.interp(freq, frecuencia, ah)
    return ahinterp
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

- α , polarização vertical: *alfavertical(freq)*

O Quadro 8 demonstra a função para obtenção de α com polarização vertical.

Quadro 8 – Código para obtenção de α com polarização vertical.

```
def alfavertical(freq):
    frequencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
                  18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
                  38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
                  58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77,
                  78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]
    av = [0.8592, 0.8957, 0.9490, 1.0085, 1.0688, 1.1387, 1.2476, 1.3987, 1.5317, 1.5882,
          1.5728, 1.4745, 1.3797, 1.2895, 1.2156, 1.1617, 1.1216, 1.0901, 1.0646, 1.0440,
          1.0273, 1.0137, 1.0025, 0.9930, 0.9847, 0.9771, 0.9700, 0.9630, 0.9561, 0.9491,
          0.9421, 0.9349, 0.9277, 0.9203, 0.9129, 0.9055, 0.8981, 0.8907, 0.8834, 0.8761,
          0.8690, 0.8621, 0.8552, 0.8486, 0.8421, 0.8357, 0.8296, 0.8236, 0.8179, 0.8123,
          0.8069, 0.8017, 0.7967, 0.7918, 0.7871, 0.7826, 0.7783, 0.7741, 0.7700, 0.7661,
          0.7623, 0.7587, 0.7552, 0.7518, 0.7486, 0.7454, 0.7424, 0.7395, 0.7366, 0.7339,
          0.7313, 0.7287, 0.7262, 0.7238, 0.7215, 0.7193, 0.7171, 0.7150, 0.7130, 0.7110,
          0.7091, 0.7073, 0.7055, 0.7038, 0.7021, 0.7004, 0.6988, 0.6973, 0.6958, 0.6943,
          0.6929, 0.6915, 0.6902, 0.6889, 0.6876, 0.6864, 0.6852, 0.6840, 0.6828, 0.6817,
          0.6806, 0.6796, 0.6785, 0.6775, 0.6765, 0.6609, 0.6466, 0.6343, 0.6262, 0.6256,
          0.6272, 0.6293, 0.6315, 0.6334, 0.6351, 0.6395]
    avinterp = np.interp(freq, frequencia, av)
    return avinterp
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

- α , polarização linear ou circular: *alfa_circular_e_linear(kh, kv, k, av, ah, angulo)*

O Quadro 9 mostra a função para obtenção de α com polarização linear ou vertical

Quadro 9 – Código para obtenção de α com polarização linear ou vertical.

```
def alfa_circular_e_linear(kh, kv, k, av, ah, angulo):
    alfa = 1/(2*k)*((kh*ah)+(kv*av)+((kh*ah)-(kv*av))*math.cos(angulo)**2)
    return alfa
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

É utilizada a biblioteca *math* para obtenção do cosseno.

5.5.3 Caminho efetivo do enlace

Essa função é a codificação da equação 61, sendo utilizada a equação 62 para obtenção do parâmetro r . O Quadro 10 mostra a função para obtenção do caminho efetivo do enlace.

Quadro 10 – Código para obtenção do caminho efetivo do enlace.

```
def caminho_efetivo(dist, intensidade_chuva, alfa, freq):
    r = 1 / (0.477*(dist**0.633)*(intensidade_chuva**(0.073*alfa))*(freq*0.123)-
            (10.579*(1-(2.718281828*dist))))
    dist_efetivo = r *dist
    return dist_efetivo
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.4 Atenuação devido à absorção das chuvas: *at_especifica_chuva(alfa, k, intensidade_chuva, caminho_efetivo)*

A atenuação devido à absorção das chuvas é calculada aplicando a equação 55. O único dado de entrada requerido para utilização dessa função é a intensidade de chuva excedida para 0,01% do tempo, os outros parâmetros para utilizar a função são obtidos através das outras funções previamente demonstradas. O Quadro 11 mostra a função para obtenção da atenuação devido à absorção das chuvas.

Quadro 11 – Código para obtenção da absorção devido às chuvas.

```
def at_especifica_chuva(alfa, k, intensidade_chuva, caminho_efetivo):
    at_espec = k * (intensidade_chuva**alfa)
    at_chuva = at_espec * caminho_efetivo
    return at_chuva
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Atenuação do guia de onda

Para o cálculo da atenuação do guia de onda não foi definida uma função, a codificação do cálculo foi colocada no escopo principal do projeto. O Quadro 12 mostra a linha de código para cálculo da atenuação do guia de onda, obtida através de dados de entrada do programa sendo esse a transcrição da equação 66.

Quadro 12 – Código para obtenção da atenuação do guia de onda.

```
atenuacao_cabos = comprimento_dos_cabos * perda_nos_cabos
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 Atenuação Total

Para o cálculo da atenuação total do guia de onda não foi definida uma função, pois esta é a soma das atenuações calculadas no programa, sendo colocada apenas como linha de código. O Quadro 13 mostra a linha de código para cálculo da atenuação total.

Quadro 13 – Código para obtenção da atenuação total.

```
atenuacao_total = at_pela_atmosfera + at_espec_chuva + atenuacao_cabos
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.8 Potência de recepção do sistema

O cálculo da recepção do sistema foi feito baseado no balanço de potência, apresentado na equação 67. Na elaboração do código não foi definida função, apenas escrita uma linha de código que utiliza os dados de entrada, potência da antena Tx, ganho da antena Tx, ganho da antena Rx, e o dado calculada, atenuação total. O Quadro 14 mostra a linha de código para cálculo da potência de recepção do sistema.

Quadro 14 – Código para obtenção da potência de recepção.

```
potencia_de_recepcao = potencia_antena_1 + ganho_antena_1 + ganho_antena_2 -  
atenuacao_total
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.9 Margem do enlace

A margem do enlace é o parâmetro final do programa, ele é obtido através da equação 74, utilizando o dado de entrada da potência de recepção nominal do equipamento, dada pelo fabricante e também do cálculo da potência de recepção. Para obtenção do parâmetro não foi definida função, apenas feita uma linha de código para o cálculo. O Quadro 15 mostra o código feito para cálculo da margem.

Quadro 15 – Código para obtenção da margem do enlace.

```
margem_do_enlace = potencia_de_recepcao - potencia_de_limiar
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 RESULTADOS

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos da pesquisa através de uma análise comparativa entre os parâmetros obtidos através da aplicação do programa desenvolvido e dos dados existentes nas normas da ITU, tabelas disponíveis em trabalhos acadêmicos e também de dois *softwares* gratuitos o *airLink* e o *LinkPlanner*.

O *airLink* é uma ferramenta *online* desenvolvida pela *Ubiquiti* que permite a simulação de radioenlaces ponto-a-ponto e ponto-área. O *LinkPlanner* é um *software* gratuito desenvolvido pela *Cambium Network* capaz de simular projetos de radioenlaces ponto-a-ponto e ponto-área.

Para obtenção dos parâmetros foram consultados dados de duas estações no Sistema de Serviços de Telecomunicações (STEL) da Anatel. As estações operam radioenlaces no serviço de comunicação multimídia e estão localizadas em Palmas, sendo a transmissora no centro e receptora no aeroporto.

6.1 Cálculo da distância

A distância foi calculada por código como demonstrado no Quadro 1. A Tabela 5 apresenta a distância do enlace proposto obtido através do código, através do *Google Maps* e através do *LinkPlanner*.

Tabela 5 – Distância do enlace estudado.

	Programa	<i>LinkPlanner</i>	<i>Google Maps</i>
Distância (km)	13,30657	13,239	13,31

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5 é possível afirmar que o cálculo da distância é satisfatório para utilização no programa.

6.2 Atenuação do espaço livre (A_e)

A atenuação do espaço livre é calculada por código apresentado no Quadro 2. Os dados obtidos na execução do programa são comparados com dados obtidos através do cálculo da equação 39 e de simulação no *software Pathloss*, para o enlace proposto. Os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação da atenuação do espaço livre.

Frequência (GHz)	A_e Programa (dB)	A_e LinkPlanner (dB)	A_e Equação (dB)
8	132,94	133,08	132,95
10	134,88	135,19	134,88
13	137,16	137,18	137,31
15	138,40	138,36	138,41
18	139,99	140,33	139,99
23	142,12	141,90	142,12

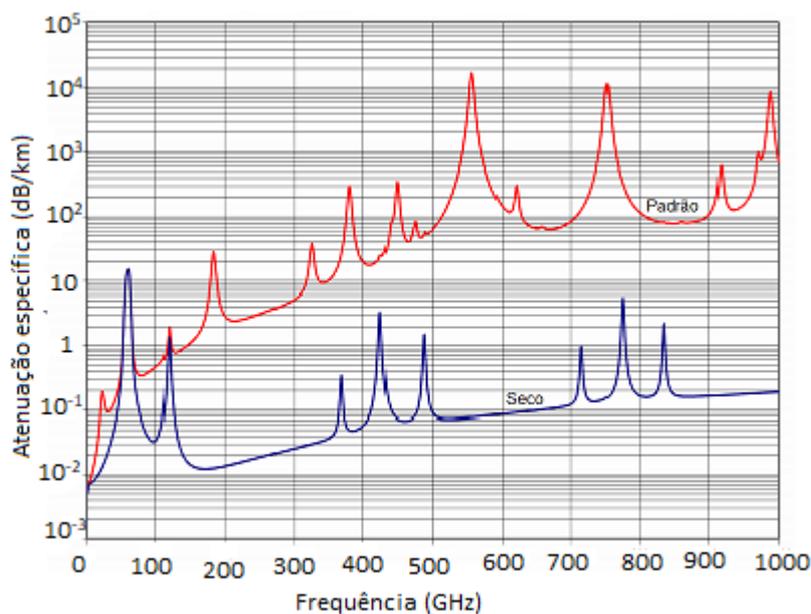
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6 é possível afirmar que o método de cálculo utilizado no programa é satisfatório. Sendo a diferença causada principalmente pela distância obtida em cada método.

6.3 Atenuação pelos gases da atmosfera (A_a)

A atenuação causada pelos gases da atmosfera é representada por valores teóricos descritos na ITU-R P. 676, apresentada na Figura 25.

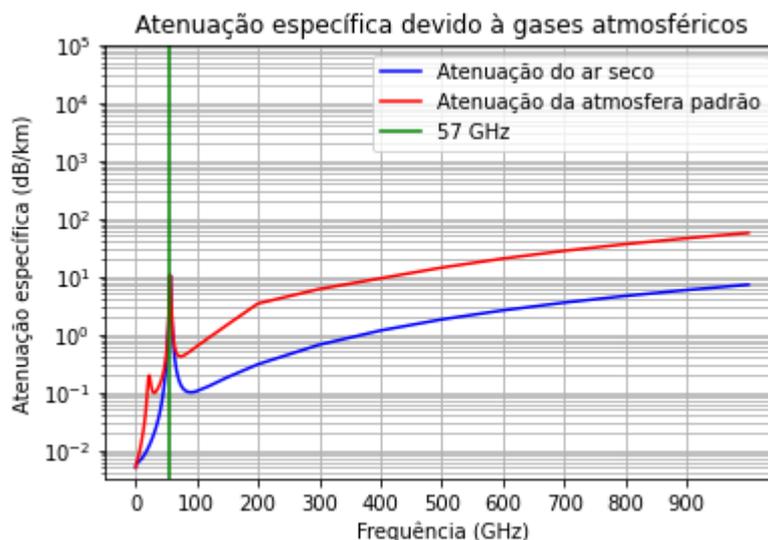
Figura 25 – Atenuação devido aos gases atmosféricos, calculados em intervalos de 1 GHz.



Fonte: Adaptado da ITU-R P. 676-12 (2019).

A partir do código gerado Quadro 2 é obtido o gráfico representado na Figura 26, para atmosfera padrão.

Figura 26 – Atenuação devido aos gases atmosféricos gerados em Python.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresentado na Figura 25 é obtido através da metodologia de cálculo apresentada na ITU-R P. 676, já o gráfico apresentado na Figura 26 apresenta o gráfico obtido através da aplicação da equação 53 para o ar seco e equação 54 para o ar úmido, equações validadas para frequências menores que 57 GHz. Por isso nota-se que o gráfico inicialmente apresenta comportamento parecido, mas em frequências maiores não apresenta boa relação.

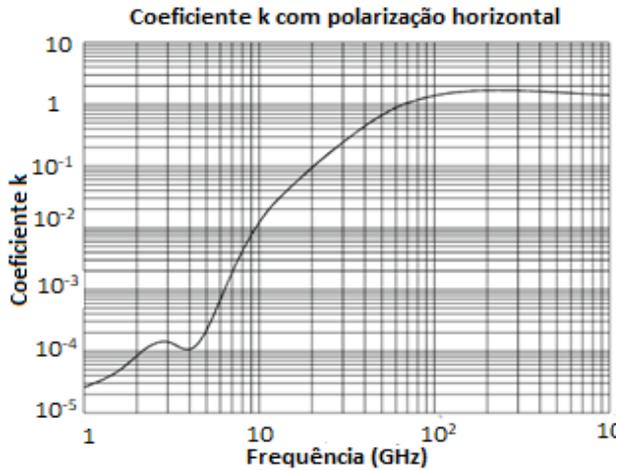
O trabalho enfoca a faixa de SHF, 3 a 33 GHz, por isso a equação é viável na aplicação da solução proposta.

6.4 Atenuação devido às chuvas ($A_{0,01}$)

6.4.1 Coeficiente k

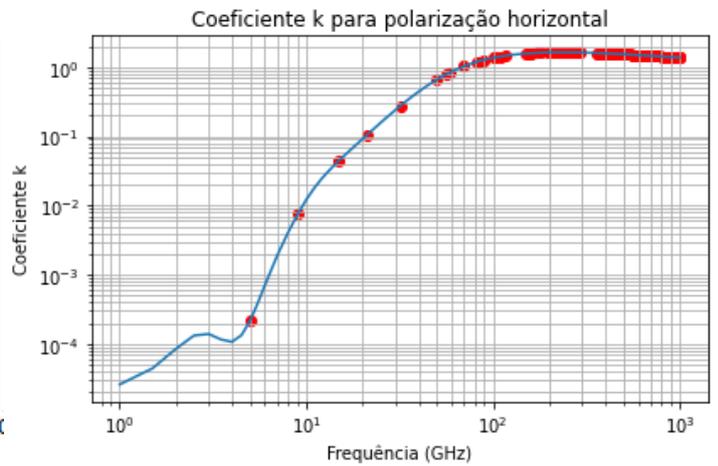
Os valores do coeficiente k são apresentados na ITU-R P. 838-3 através de gráficos, Figuras 27 e 29. Os valores para o coeficiente k utilizados no trabalho são obtidos através da interpolação logarítmica dos valores apresentados na mesma recomendação. A interpolação dos valores está expressa nos Quadros 3 e 4. Para comparação do gráfico contido na recomendação e o obtido pelo programa foram testados valores aleatórios e observado se os valores obtidos pertenciam ao gráfico. As Figuras 28 e 30 apresentam o gráfico obtido, sendo os pontos vermelhos os valores não tabelados.

Figura 27 – Coeficiente k para polarização horizontal obtido na ITU-R P. 838-3.



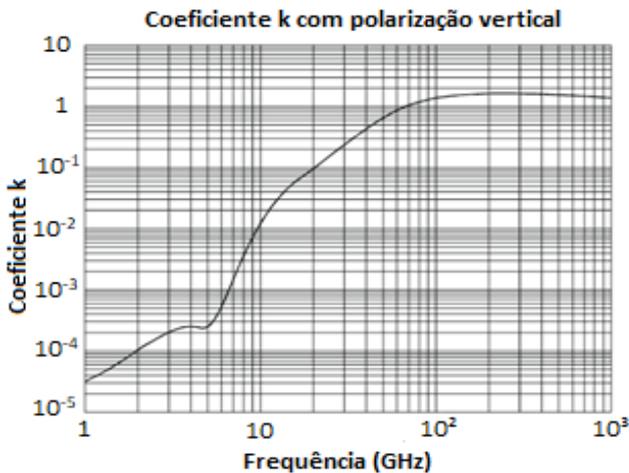
Fonte: Adaptado, ITU-R P. 838-3 (2005).

Figura 28 – Coeficiente k para polarização horizontal obtido no Python.



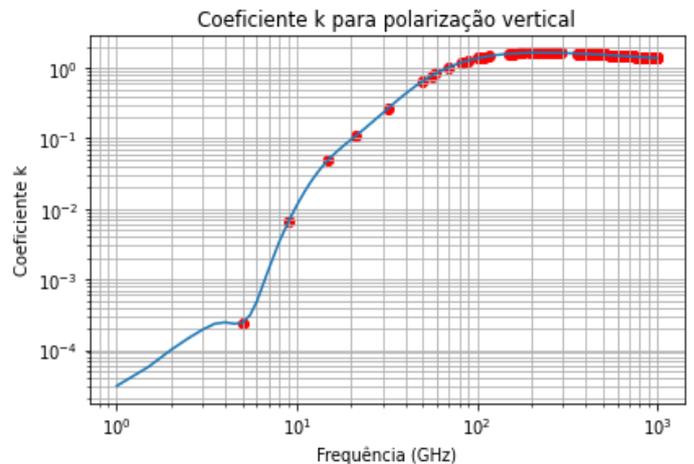
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Coeficiente k para polarização vertical obtido na ITU-R P. 838-3



Fonte: Adaptado, ITU-R P. 838-3 (2005).

Figura 30 – Coeficiente k para polarização vertical obtido no Python.



Fonte: Elaborado pelo autor.

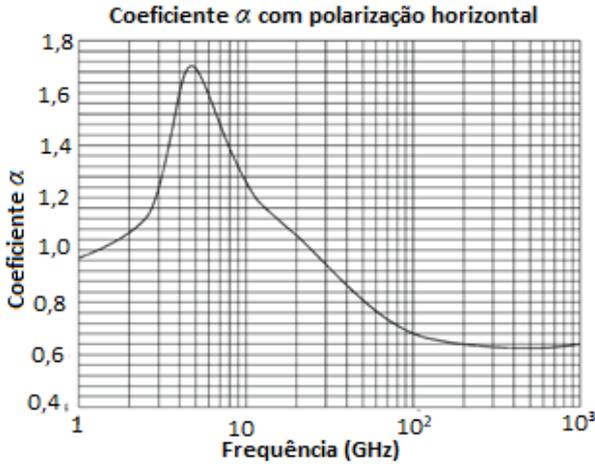
A partir dos gráficos obtidos é possível afirmar que a aproximação é satisfatória e apresenta um bom método de cálculo.

6.4.2 Coeficiente α

Os valores do coeficiente α são apresentados na ITU-R P. 838-3 através de gráficos, Figuras 31 e 33. Os valores para o coeficiente α utilizados no trabalho são obtidos através da interpolação linear dos valores apresentados na mesma recomendação. A interpolação dos valores está expressa nos Quadros 6 e 7. Para comparação do gráfico contido na recomendação e o obtido pelo programa foram testados valores aleatórios e observado se os valores obtidos

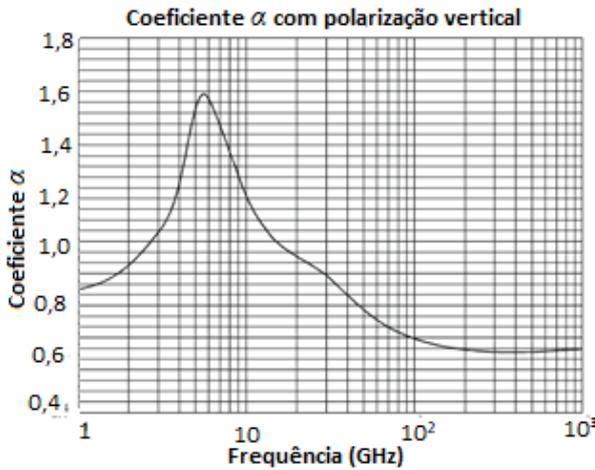
pertenciam ao gráfico. As Figuras 32 e 34 apresentam o gráfico obtido, sendo os pontos vermelhos os valores não tabelados.

Figura 31 – Coeficiente α para polarização horizontal obtido na ITU-R P. 838-3.



Fonte: Adaptado, ITU-R P. 838-3 (2005).

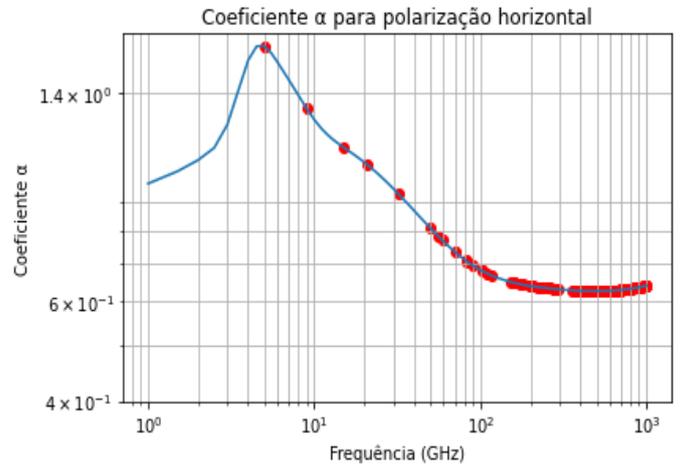
Figura 33 – Coeficiente α para polarização vertical obtido na ITU-R P. 838-3.



Fonte: Adaptado, ITU-R P. 838-3 (2005).

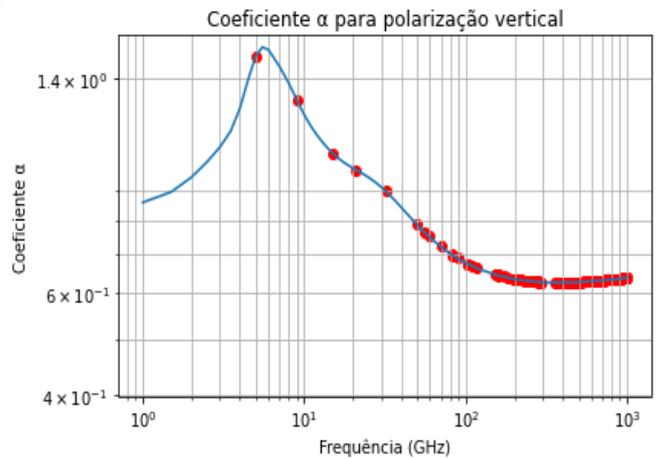
A partir dos gráficos obtidos é possível afirmar que a aproximação é satisfatória e apresenta um bom método de cálculo.

Figura 32 – Coeficiente α para polarização horizontal obtido no Python.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Coeficiente α para polarização vertical obtido no Python.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Aplicação do *software*

A validação é feita utilizando os dados obtidos no STEL para duas antenas em Palmas/TO, os dados da Tabela 7 apresentam os parâmetros das estações.

Tabela 7 – Dados das estações utilizadas na simulação do enlace.

	Antena Rx	Antena Tx
Município	Palmas/TO	Palmas/TO
Entidade	Claro	Claro
Serviço	Radioenlaces associados ao Serviço de Comunicação Multimídia	Radioenlaces associados ao Serviço de Comunicação Multimídia
Endereço	ACSU SO 20, Conjunto 02, Lote 08, S/N, Centro	Av. Teotônio Segurado, S/N, Expansão Sul, Aeroporto Brigadeiro Lysias Rodrigues, Aurenly III
Latitude (decimal)	-10,179557	-10,297456
Longitude (decimal)	-48,335944	-48,356781
Altitude (m)	230	274
Tipo de antena	Antena com refletor parabólico	Antena com refletor parabólico
Frequência de transmissão (GHz)	14,998	14,718
Frequência de recepção (GHz)	14,578	15,1386
Potência (mW/dBm)	199,53 / 23	125,89 / 21
Ganho (dBi)	36,5	36,5
F/B (dB)	62	62
Ângulo de ½ potência (°)	2,4	2,4
Elevação(°)	-0,4	-0,18
Polarização	Vertical	Vertical
Altura (m)	45	25

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desses dados são simulados um radioenlace no *software* elaborado e no *LinkPlanner* para validação dos resultados.

Para entrada dos parâmetros é necessário realizar consulta dos dados meteorológicos da região. Na cidade de Palmas a temperatura média anual é de 26°C, de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para essa temperatura a pressão de vapor de água é de 13 kg/m³. A taxa de precipitação anual é de 108,75 mm/h.

Para os cálculos da atenuação dos cabos considera-se uma atenuação de 0,56 dB/m em cabos coaxiais operando em altas frequências. Como os equipamentos utilizados em sistemas de micro-ondas possuem certa margem para essas atenuações considera-se apenas a altura das antenas para comprimento dos cabos, totalizando 70 m.

Foi considerado um equipamento com potência limiar de recepção de -80 dBm.

Com base nessas informações, os dados de entrada para utilização do programa desenvolvido são:

- Frequência: 14,998 GHz;
- Potência da antena transmissora: 23 dBm;
- Ganho da antena transmissora: 36,5 dBi;
- Ganho da antena receptora: 36,5 dBi;
- Latitude da estação Tx: -10,179557;
- Longitude da estação Tx: -48,335944
- Latitude da estação Rx: -10,297456;
- Longitude da estação Rx: -48,356781;
- Densidade do vapor de água: 13 kg/m³;
- Intensidade de chuva: 108,75 mm/h;
- Potência limiar de recepção do equipamento: -80 dBm;
- Comprimento dos cabos: 70 m;
- Perda nos cabos: 0,5 dB/m;
- Polarização: Vertical.

A Figura 35 mostra a entrada de dados no *software*.

Figura 35 – Entrada de dados no programa desenvolvido.

```

Bem vindo! Insira os dados necessários para o cálculo das perdas devido à propagação atmosférica.
Digite a frequência em GHz: 14.998
Informe a potência da Antena Tx em dBm: 23
Informe o Ganho da Antena Tx em dBi: 36.5
Informe o ganho da Antena Rx em dBi: 36.5
Informe as coordenadas dos pontos que estão localizadas as antenas:
Digite a latitude decimal da antena Tx: -10.179557
Digite a longitude decimal da antena Tx: -48.335944
Digite a latitude decimal da antena Rx: -10.297456
Digite a longitude decimal da antena Rx: -48.356781
A distância entre as duas torres em km é: 13.306570660460208 km
Digite a densidade do vapor de água em kg/m³: 13
Digite a intensidade de chuva excedida durante 0,01% do tempo em mm/h: 108.75
Digite a potência limiar de recepção do equipamento em dBm: -80
Digite o comprimento dos cabos para conectar a antena m: 70
Digite a perda nos cabos em dB/m: 0.5
Informe o tipo de polarização do enlace:
1 - Horizontal
2 - Vertical
3 - Circular
4 - Linear
2

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados retornados pelo programa são:

- Atenuação pelos gases da atmosfera: 0,6453 dB;
- Atenuação no espaço livre: 138,4019 dB;
- Atenuação devido às chuvas: 0,2393 dB;
- Atenuação total do sistema: 174,2866 dB;
- Potência de recepção do sistema: -78.2866 dBm;
- Margem do enlace: 1,7134 dBm.

A Figura 36 mostra os resultados obtidos no programa.

Figura 36 – Resultados obtidos no programa desenvolvido.

```

A atenuação pelos gases da atmosfera é 0.6452716715429138 dB
A atenuação no espaço livre é 138.4019898751837 dB
A atenuação no enlace devido as chuvas é de 0.23934768989461483 dB
A atenuação total do sistema é de 174.28660923662122 dB
A potência de recepção do sistema é -78.28660923662122 dBm
A margem do enlace é de 1.7133907633787828 dB

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.6 Comparação com outros *softwares*

O exemplo feito na Seção 6.5 foi realizado também nos *softwares airLink* e *LinkPlanner*. Ambos são gratuitos e são capazes de simular projetos de radioenlace ponto a ponto e ponto área.

Para a simulação de radioenlaces ponto a ponto a principal vantagem dos programas disponíveis no mercado está na obtenção do perfil de terreno, importante para garantir a linha de visada direta entre as antenas do enlace eliminando as perdas por difração, no *software* desenvolvido essa consulta não é realizada, sendo necessário pesquisa de campo e/ou utilização de ferramentas, como *Google Earth*, para obtenção do perfil de terreno e garantia da linha de visada direta.

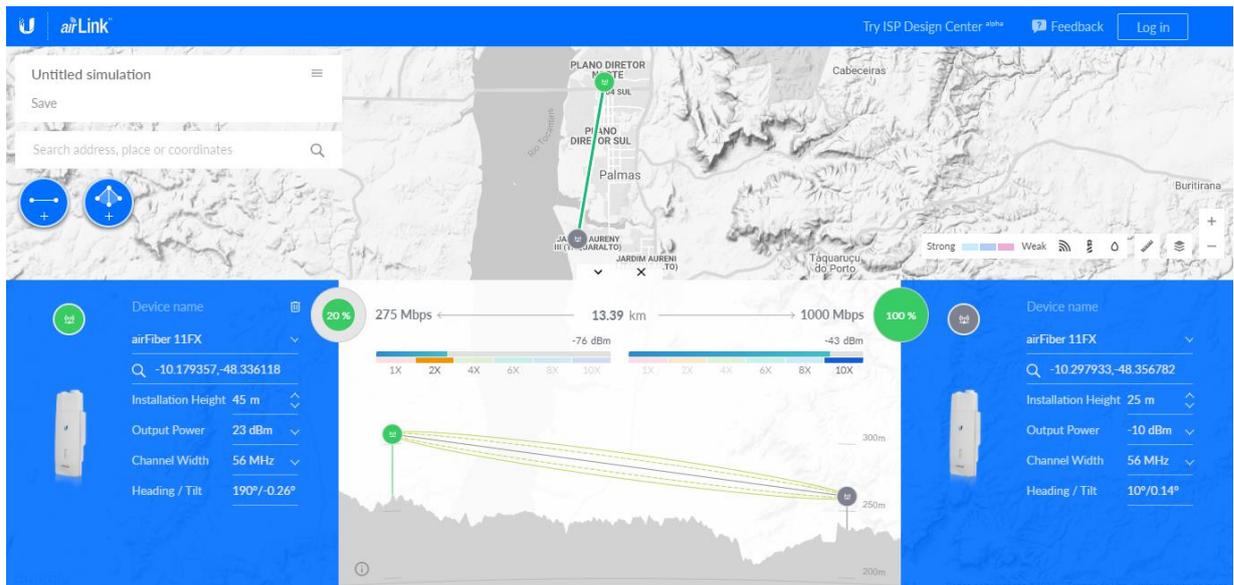
O *software* desenvolvido tem a vantagem de inserção manual dos parâmetros, assim com a posse do *datasheet* dos equipamentos utilizados no enlace é possível calcular as perdas e a margem do projeto para qualquer valor de frequência de operação, ganho, potência e limiar de recepção, já os programas existentes por serem mantidos por fabricantes de equipamentos permitem apenas a inserção dos próprios equipamentos com os parâmetros fabricados.

- *airLink*

O *airLink* é um *software* desenvolvido pela *Ubiquiti* disponível *online*, não sendo necessário baixar o programa. Ele permite fazer simulações de projetos ponto a ponto e ponto área.

Para utilizá-lo é necessário inserir a localização das antenas e a altura das torres, então retornará o perfil de terreno e a linha de visada do enlace. Após isso é necessário escolher uma antena dentro do banco de dados das antenas fabricadas pela *Ubiquiti*. Com a escolha da antena é necessário informar a potência irradiada e a largura de banda, o programa então informa a potência de recepção do sistema. A Figura 37 mostra o resultado obtido com o *airLink*.

Figura 37 – Simulação de enlace utilizando o *air Link*.



Fonte: Obtido no site do *airLink*.

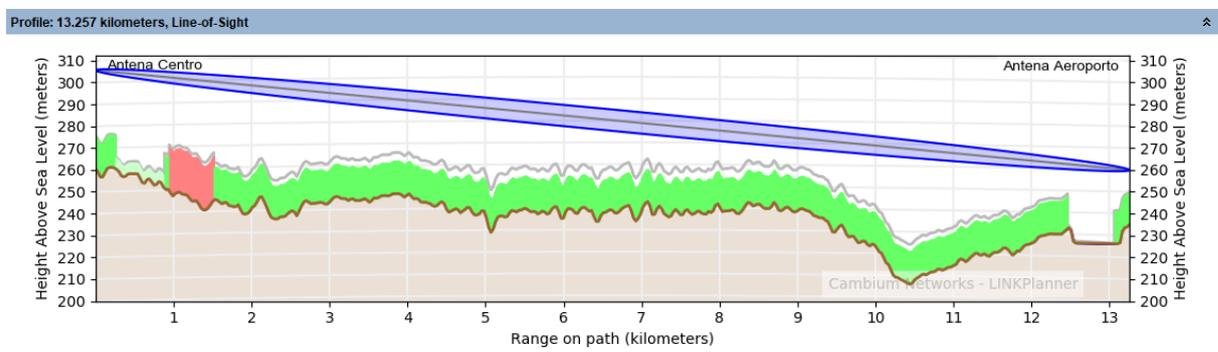
- *LinkPlanner*

O *LinkPlanner* é um *software* gratuito mantido pela *Cambium Network*, é necessário baixar e instalar o programa para utilizá-lo. Ele permite fazer simulações de projetos ponto a ponto e ponto área.

Para utilizá-lo é necessário inserir a localização das duas antenas, a banda de frequência utilizada, o equipamento a ser utilizado, o tipo do enlace, a largura de banda, a polarização e a frequência de transmissão.

O programa retorna o perfil de terreno com a linha de visada direta do enlace e as informações sobre as perdas e taxa de transmissão de dados. A Figura 37 mostra o perfil de terreno obtido pelo programa e a Figura 38 os dados retornados pelo programa.

Figura 38 – Perfil de terreno obtido pelo *LinkPlanner*.



Fonte: Obtido no *LinkPlanner*.

Figura 39 – Dados obtidos pela simulação no *LinkPlanner*.

Link Summary	
Aggregate IP Throughput :	839.51 Mbps
Lowest Mode Availability :	99.9870 % i
System Gain Margin :	32.03 dB
Free Space Path Loss :	138.42 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.71 dB
Excess Path Loss :	0.00 dB
Total Path Loss :	139.15 dB

Fonte: Obtido no *LinkPlanner*.

6.6.1 Comparação dos dados

A partir dos dados obtidos em outros *softwares* é possível afirmar que os métodos utilizados pelo programa desenvolvido são satisfatórios.

Na Figura 34 é observada potência de recepção da estação do aeroporto de -76 dBm já no *software* desenvolvido a potência de recepção obtida foi de -78,28 dBm. A diferença pode ser devido à alguma perda prevista no programa desenvolvido que não é considerada pelo *airLink*.

A comparação dos resultados obtidos no *software* desenvolvido com os obtidos pelo *LinkPlanner* está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação de dados simulados pelo programa e pelo *LinkPlanner*.

	<i>Software desenvolvido</i>	<i>LinkPlanner</i>
A_e (dB)	138,40	138,42
A_a (dB)	0,64	0,71
A_t (dB)	174,29	139,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor das atenuações pelo espaço livre e pela absorção da atmosfera obtidos são próximos, mas nota-se uma grande diferença na atenuação total do sistema. A causa dessa diferença se deve ao *LinkPlanner* não considerar a atenuação causada pelos cabos, atenuação de valor alto, tendo em vista a altura das antenas. Apesar dessa diferença a análise dos resultados confirma que o método utilizado pelo programa desenvolvido para cálculo das atenuações é satisfatório.

Todos as ferramentas utilizadas apresentam vantagens e desvantagens, essas estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9 – Vantagens e desvantagens dos *softwares* utilizados.

	Vantagens	Desvantagens
Software Desenvolvido	<ul style="list-style-type: none"> • Liberdade na inserção de parâmetros; • Consideração da atenuação dos cabos e guias de onda; • Cálculo da margem do enlace, parâmetro importante para estudo da viabilidade do projeto; • Apresentação dos valores de atenuação são apresentados separadamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de interface gráfica para facilitação do uso; • Aplicabilidade apenas até 57 GHz; • Ausência de banco de dados de antenas; • Não apresenta o perfil de terreno do caminho do enlace.
<i>airLink</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ferramenta <i>web</i>, não é necessário baixar; • Fácil de utilizar; • Apresenta o perfil de terreno do caminho do enlace. 	<ul style="list-style-type: none"> • O banco de dados de antena apresenta apenas dados das antenas <i>Ubiquiti</i>; • Não há tanta liberdade para inserção dos parâmetros.
<i>LinkPlanner</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta o perfil de terreno no caminho do enlace; • É possível alterar e simular diversos parâmetros; • Fácil de utilizar. 	<ul style="list-style-type: none"> • O banco de dados de antenas apresenta apenas dados das antenas <i>Cambium Networks</i>.

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÃO

No decorrer do trabalho foram apresentados os conceitos envolvidos na propagação de ondas no espaço livre, detalhando sua aplicabilidade na transmissão de dados por meio de radioenlaces ponto a ponto e por fim foi apresentado uma solução para cálculo das atenuações sofridas em projetos dessa natureza, atingindo o objetivo principal do trabalho.

Para exposição dos conceitos de propagação de ondas no espaço livre foram detalhados os fenômenos envolvidos e como eles influenciam na elaboração de um projeto de rota de micro-ondas através de pesquisa bibliográfica em material acadêmico.

A elaboração do *software* demandou a aplicação de técnicas de programação e do estudo exposto no trabalho. No Capítulo 5 foi apresentado o desenvolvimento do programa e a codificação do programa.

O Capítulo 6 apresentou os testes feitos no código desenvolvido, garantindo assim a eficiência da utilização do programa, alcançando resultados bem próximos a resultados apresentados em cálculos feitos por outras metodologias e dados obtidos através de simulação em outros *softwares* disponíveis.

O programa desenvolvido aplica aproximações encontradas em literatura relacionada ao assunto e cálculos retratados em recomendações da ITU. As aproximações utilizadas garantem um bom método de cálculo para valores de frequência até 57 GHz validando a ferramenta para utilização de todas as frequências dentro da faixa de SHF.

A escolha da faixa de SHF foi realizada, pois nessa faixa devem ser consideradas as atenuações pelo espaço livre e devido às chuvas, além de sua ampla utilização em diversos serviços de telecomunicações.

7.1 Contribuições do trabalho

O desenvolvimento do programa e apresentação das funções definidas bem como das bibliotecas utilizadas demonstram a aplicabilidade de linguagens de programação para o estudo de fenômenos ocorridos na propagação de micro-ondas. Com a comparação dos resultados obtidos com resultados já existentes e da simulação em outras ferramentas é possível afirmar que *Python* é aplicável nos estudos dessa área.

Softwares desenvolvidos por fabricantes de produtos e soluções de telecomunicações são limitados a inserção de parâmetros que sejam compatíveis com os equipamentos fabricados por eles. Dessa forma o programa desenvolvido conseguiu de maneira satisfatória elaborar uma

ferramenta de cálculo de atenuações e margem de radioenlaces ponto a ponto que permitisse o usuário inserir os parâmetros de antenas de quaisquer fabricantes, ficando assim o projetista livre para elaboração de um projeto com os parâmetros que lhe interessar.

Para compreensão e aprendizado de como realizar projetos de rota de micro-ondas é necessário o entendimento todos os parâmetros e como eles afetam a propagação. Em vista dessa necessidade de compreensão de cada parâmetro separadamente o *software* projetado atende as necessidades de um *software* educacional na área de projetos de rota de micro-ondas, pois são retornados os valores de atenuação separadamente, permitindo que o estudante assimile a teoria através de valores numéricos qual tipo de atenuação interfere mais e menos no enlace, bem como a liberdade de inserção de parâmetros permite o estudo das interferências em diferentes valores de frequência.

7.2 Trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, puderam ser identificadas algumas possibilidades de melhoria e de continuação a partir de futuras pesquisas, as quais incluem:

- Desenvolvimento de programação para aplicabilidade dos códigos elaborados em *software* comercial, a partir de desenvolvimento de interface gráfica, implementação de banco de dados de antenas e equipamentos disponíveis no mercado, além de aplicação de ferramentas de *machine learning* e inteligência artificial capaz de realizar métodos de predição para escolha da melhor localização para as estações.
- Implementação de métodos para trabalhar em frequências maiores, acrescentando cálculos de disponibilidade e interferência.
- Desenvolvimento de métodos capazes de efetuar projetos ponto-área.
- Estudo de aplicabilidade da faixa de SHF na aplicação do 5G.

REFERÊNCIAS

- Anatel. Resolução nº 399, de 15 de abril de 2005. **Norma Para Certificação E Homologação De Conectores Para Cabos Coaxiais**. Brasília, 2005.
- Anatel. Resolução nº 716, de 31 de outubro de 2019. **Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil**. Brasília, 2019.
- BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 2. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 1997.
- BARROS JUNIOR, José Iran Reinaldo. **Análise de Desempenho de um Enlace Ponto a Ponto Entre Meruoca e Sobral**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2017.
- BRANDÃO, Tiago Henrique. **Antenas Parabólicas de Banda Dupla Baseadas em FSS para Radares e Comunicação**. 2019. Dissertação – Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita de Sapucaí, 2019.
- BRASIL. Decreto nº 10.282, de 20 de março de 2020. Regulamenta a Lei nº 13.979, de 6 de fevereiro de 2020, para definir os serviços públicos e as atividades essenciais. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2020.
- CAÑADAS, María Laó. **Simulador en Python del efecto de múltiples obstáculos sobre un radioenlace según la Rec. ITU-R P.526**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Telecomunicações – Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- DIAS, R. R. M.; PIAU, D. B.; SANTOS, Y. G.; BRAGA C. M. P.; SILVA, H. F. C. Projeto de enlace de micro-ondas associado a atenuação no espaço livre e atmosférica utilizando softwares comerciais. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS DE ENGENHARIA ELÉTRICA – XIV CEEL, 2016, Uberlândia.
- FELICE, Fernando. **Análise Do Desempenho De Enlaces Ponto-Aponto Utilizando A Faixa De Frequência Não Licenciada De 2,4ghz Em Tecnologia Spread Spectrum**. 2005. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- GALA, Pablo Bayon. **Simulador en Python para el cálculo de pérdidas de propagación según la Rec. ITU-R P.530**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Telecomunicações – Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2019.
- HENNE, Ingvar; THORVALDSEN, Per. **Planning of line-of-sight radio relay systems**. 2. ed. Bergen: Nera, 1999.
- INPE. **Estação de Palmas - Climatologia Local**. 2021. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/palmas_clima.html>. Acesso em: 04/04/2021
- ITU Recommendation. ITU-R P 453-14, **The radio refractive index: its formula and refractivity data**. Genebra, 2019. ITU, 2019.

ITU Recommendation. ITU-R P 526-15, **Propagation by diffraction**. Genebra, 2019. ITU, 2019.

ITU Recommendation. ITU-R P 530-17, **Propagation Data and Prediction Methods Required for The Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems**. Genebra, 2017. ITU, 2017.

ITU Recommendation. ITU-R P 676-12, **Attenuation by atmospheric gases and related effects**. Genebra, 2019. ITU, 2019.

ITU Recommendation. ITU-R P 838-3, **Specific Attenuation Model for Rain for Use In Prediction Methods**. Genebra, 2005. ITU, 2005.

ITU Recommendation. ITU-R PN 837-7, **Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling**. Genebra, 2017. ITU, 2017.

MANNING, Trevor. **Microwave radio transmission design guide**. 2. ed. Norwood: Artech House, 2009.

MATIAS, Mauricio. **Antena Yagi de 433Mhz**. 2019. Disponível em: <https://medium.com/@cr0wg4n/antena-yagi-de-433mhz-diy-bd568013c3fc>. Acesso em: 15 set. 2020.

ONGARATO, Diego Atiê S. **Projeto de Sistemas de Comunicação Microondas – Rádio Ponto a Ponto**. 2009. 86 f. Projeto de Diplomação – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009

PIAU, Diego de Brito. **Projeto de Dimensionamento de Enlace de Rádio Associado a Atenuações Devido à Chuva Utilizando CelPlan e Pathloss**. 2016. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

PIAU, D. B; CARRIJO, G. A. Projeto de Dimensionamento de Enlace de Rádio. **Ciência e Engenharia**, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 81-90, dez. 2014.

POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 4. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2012.

PYTHON. **Python**, 2021. Python: About. Disponível em: <https://www.python.org/about/>. Acesso em 30/03/2021.

RAMOS, Nieremberg José Pereira de Lima. **Caracterização de Antena Tipo Refletor de Canto Utilizando Superfícies Seletivas em Frequência**. 2013. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2016.

RAPPAPORT, Theodore S. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. Equações de Maxwell. In: REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1982. p. 324-343.

BERMÚDEZ, José María Rodríguez. **Estudio de la viabilidad de radioenlaces**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Telecomunicações – Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2019.

SILVA, Fábio Neponucemo. **Cálculo De Desempenho, Disponibilidade E Interferências Para Radioenlaces**. 2003. Trabalho de Graduação – Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

SILVA, Rogério de Andrade. **Validação da Viabilidade de Rádio Enlace Utilizando o Software Pathloss 5.0**. 2003. Trabalho final de estágio – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

APÊNDICE A – *distancia.py*

```
import math

def dist(lat1, lng1, lat2, lng2):
    rad = math.pi / 180
    dlat = float(lat2) - float(lat1)
    dlng = float(lng2) - float(lng1)
    a = (math.sin(rad * dlat / 2)) ** 2 + math.cos(rad * float(lat1)) *
        math.cos(rad * float(lat2)) * \ (math.sin(rad * dlng / 2)) ** 2
    distancia = 2 * 6371 * math.asin(math.sqrt(a))
    return distancia
```

APÊNDICE B – *atenuacaochuva.py*

```

import math
import numpy as np

def khorizontal(freq):
    frequencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
                  12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,
                  22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
                  37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
                  47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
                  62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
                  72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
                  87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700,
                  800, 900, 1000]
    kh = [0.0000259, 0.0000443, 0.0000847, 0.0001321, 0.0001390, 0.0001155,
          0.0001071, 0.0001340, 0.0002162, 0.0003909,
          0.0007056, 0.001915, 0.004115, 0.007535, 0.01217, 0.01772, 0.02386,
          0.03041, 0.03738, 0.04481, 0.05282,
          0.06146, 0.07078, 0.08084, 0.09164, 0.1032, 0.1155, 0.1286, 0.1425,
          0.1571, 0.1724, 0.1884, 0.2051, 0.2224,
          0.2403, 0.2588, 0.2778, 0.2972, 0.3171, 0.3374, 0.3580, 0.3789,
          0.4001, 0.4215, 0.4431, 0.4647, 0.4865,
          0.5084, 0.5302, 0.5521, 0.5738, 0.5956, 0.6172, 0.6386, 0.6600,
          0.6811, 0.7020, 0.7228, 0.7433, 0.7635,
          0.7835, 0.8032, 0.8226, 0.8418, 0.8606, 0.8791, 0.8974, 0.9153,
          0.9328, 0.9501, 0.9670, 0.9836, 0.9999,
          1.0159, 1.0315, 1.0468, 1.0618, 1.0764, 1.0908, 1.1048, 1.1185,
          1.1320, 1.1451, 1.1579, 1.1704, 1.1827,
          1.1946, 1.2063, 1.2177, 1.2289, 1.2398, 1.2504, 1.2607, 1.2708,
          1.2807, 1.2903, 1.2997, 1.3089, 1.3179,
          1.3266, 1.3351, 1.3434, 1.3515, 1.3594, 1.3671, 1.4866, 1.5823,
          1.6378, 1.6286, 1.5860, 1.5418, 1.5013,
          1.4654, 1.4335, 1.4050, 1.3795]
    logfreq = np.log10(freq)
    logfrequencia = np.log10(frequencia)
    logkh = np.log10(kh)
    khinterp = np.power(10.0, np.interp(logfreq, logfrequencia, logkh))
    return khinterp

```

```

def kvertical(freq):
    frecuencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
                  12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,
                  22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
                  37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
                  47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
                  62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
                  72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
                  87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700,
                  800, 900, 1000]
    kv = [0.0000308, 0.0000574, 0.0000998, 0.0001464, 0.0001942, 0.0002346,
          0.0002461, 0.0002347, 0.0002428, 0.0003115,
          0.0004878, 0.001425, 0.003450, 0.006691, 0.01129, 0.01731, 0.02455,
          0.03266, 0.04126, 0.05008,
          0.05899, 0.06797, 0.07708, 0.08642, 0.09611, 0.1063, 0.1170,
          0.1284, 0.1404, 0.1533, 0.1669, 0.1813, 0.1964,
          0.2124, 0.2291, 0.2465, 0.2646, 0.2833, 0.3026, 0.3224, 0.3427,
          0.3633, 0.3844, 0.4058, 0.4274, 0.4492,
          0.4712, 0.4932, 0.5153, 0.5375, 0.5596, 0.5817, 0.6037, 0.6255,
          0.6472, 0.6687, 0.6901, 0.7112, 0.7321,
          0.7527, 0.7730, 0.7931, 0.8129, 0.8324, 0.8515, 0.8704, 0.8889,
          0.9071, 0.9250, 0.9425, 0.9598, 0.9767,
          0.9932, 1.0094, 1.0253, 1.0409, 1.0561, 1.0711, 1.0857, 1.1000,
          1.1139, 1.1276, 1.1410, 1.1541, 1.1668,
          1.1793, 1.1915, 1.2034, 1.2151, 1.2265, 1.2376, 1.2484, 1.2590,
          1.2694, 1.2795, 1.2893, 1.2989, 1.3083,
          1.3175, 1.3265, 1.3352, 1.3437, 1.3520, 1.3601, 1.3680, 1.4911,
          1.5896, 1.6443, 1.6286, 1.5820, 1.5366,
          1.4967, 1.4622, 1.4321, 1.4056, 1.3822]
    logfreq = np.log10(freq)
    logfrecuencia = np.log10(frecuencia)
    logkv = np.log10(kv)
    kvinterp = np.power(10.0, np.interp(logfreq, logfrecuencia, logkv))
    return kvinterp

```

```

def alfahorizontal(freq):
    frecuencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
                  12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,
                  22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
                  37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
                  47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
                  62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
                  72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
                  87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700,
                  800, 900, 1000]
    ah = [0.9691, 1.0185, 1.0664, 1.1209, 1.2322, 1.4189, 1.6009, 1.6948,
          1.6969, 1.6499, 1.5900, 1.4810, 1.3905,
          1.3155, 1.2571, 1.2140, 1.1825, 1.1586, 1.1396, 1.1233, 1.1086,
          1.0949, 1.0818, 1.0691, 1.0568, 1.0447,
          1.0329, 1.0214, 1.0101, 0.9991, 0.9884, 0.9780, 0.9679, 0.9580,
          0.9485, 0.9392, 0.9302, 0.9214, 0.9129,
          0.9047, 0.8967, 0.8890, 0.8816, 0.8743, 0.8673, 0.8605, 0.8539,
          0.8476, 0.8414, 0.8355, 0.8297, 0.8241,
          0.8187, 0.8134, 0.8084, 0.8034, 0.7987, 0.7941, 0.7896, 0.7853,
          0.7811, 0.7771, 0.7731, 0.7693, 0.7656,
          0.7621, 0.7586, 0.7552, 0.7520, 0.7488, 0.7458, 0.7428, 0.7400,
          0.7372, 0.7345, 0.7318, 0.7293, 0.7268,
          0.7244, 0.7221, 0.7199, 0.7177, 0.7156, 0.7135, 0.7115, 0.7096,
          0.7077, 0.7058, 0.7040, 0.7023, 0.7006,
          0.6990, 0.6974, 0.6959, 0.6944, 0.6929, 0.6915, 0.6901, 0.6888,
          0.6875, 0.6862, 0.6850, 0.6838, 0.6826,
          0.6815, 0.6640, 0.6494, 0.6382, 0.6296, 0.6262, 0.6253, 0.6262,
          0.6284, 0.6315, 0.6353, 0.6396]
    ahinterp = np.interp(freq, frecuencia, ah)
    return ahinterp

```

```

def alfavertical(freq):
    frecuencia = [1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
                  12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,
                  22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
                  37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
                  47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
                  62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,
                  72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
                  87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,
                  97, 98, 99, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700,
                  800, 900, 1000]
    av = [0.8592, 0.8957, 0.9490, 1.0085, 1.0688, 1.1387, 1.2476, 1.3987,
          1.5317, 1.5882, 1.5728, 1.4745, 1.3797, 1.2895,
          1.2156, 1.1617, 1.1216, 1.0901, 1.0646, 1.0440, 1.0273, 1.0137,
          1.0025, 0.9930, 0.9847, 0.9771, 0.9700, 0.9630, 0.9561, 0.9491,
          0.9421, 0.9349, 0.9277, 0.9203, 0.9129,
          0.9055, 0.8981, 0.8907, 0.8834, 0.8761, 0.8690, 0.8621, 0.8552,
          0.8486, 0.8421, 0.8357, 0.8296, 0.8236,
          0.8179, 0.8123, 0.8069, 0.8017, 0.7967, 0.7918, 0.7871, 0.7826,
          0.7783, 0.7741, 0.7700, 0.7661, 0.7623,
          0.7587, 0.7552, 0.7518, 0.7486, 0.7454, 0.7424, 0.7395, 0.7366,
          0.7339, 0.7313, 0.7287, 0.7262, 0.7238,
          0.7215, 0.7193, 0.7171, 0.7150, 0.7130, 0.7110, 0.7091, 0.7073,
          0.7055, 0.7038, 0.7021, 0.7004, 0.6988,
          0.6973, 0.6958, 0.6943, 0.6929, 0.6915, 0.6902, 0.6889, 0.6876,
          0.6864, 0.6852, 0.6840, 0.6828, 0.6817,
          0.6806, 0.6796, 0.6785, 0.6775, 0.6765, 0.6609, 0.6466, 0.6343,
          0.6262, 0.6256, 0.6272, 0.6293, 0.6315, 0.6334, 0.6351, 0.6395]
    avinterp = np.interp(freq, frecuencia, av)
    return avinterp

def k_circular_e_linear(kh, kv, angulo):
    k = 1/2 * (kh + kv + ((kh - kv)*(math.cos(angulo)**2)))
    return k

def alfa_circular_e_linear(kh, kv, k, av, ah, angulo):
    alfa = 1/(2*k)*((kh*ah)+(kv*av)+((kh*ah)-(kv*av)*math.cos(angulo)**2))
    return alfa

```

```
def caminho_efetivo(dist, intensidade_chuva, alfa, freq):  
  
    r =1/(0.477*(dist**0.633)*(intensidade_chuva**(0.073*alfa))*(freq*0.123)-  
        (10.579*(1-(2.718281828*dist))))  
    dist_efetivo = r * dist  
    return dist_efetivo  
  
def at_especifica_chuva(alfa, k, intensidade_chuva, distancia_efetivo):  
    at_espec = k * (intensidade_chuva**alfa)  
    at_chuva = at_espec * distancia_efetivo  
    return at_chuva
```

APÊNDICE C – *atenuacaoatmosfera.py*

```
import math

def at_espacolivre(freq, distenlace):
    at_espaco_livre = 32.4 + 20 * math.log((freq/1000)*distenlace, 10)
    return at_espaco_livre

def at_absorcao_atm(dist, freq, densidade_vapor):
    at_seco = (7.19 * (10**(-3)) + (6.09/((freq**2)+0.227) + (4.81/
        (((freq-57)**2)+1.5)))) * freq**2 * (10**(-3))
    at_umido = (0.05 + (0.0021*densidade_vapor) + (3.6/(((freq-22.2)**2)+8.5))
        + (10.6/(((freq - 183.3)**2)+9)) +
        (8.9/(((freq - 325.4)**2)+26.3))) * densidade_vapor * freq**2
        * (10**(-4))
    atenuacao_absorcao_atm = (at_seco + at_umido) * dist
    return atenuacao_absorcao_atm
```

APÊNDICE D – *principal.py*

```

import calculos
import atenuacoesespacolivre
import atenuacaochuva

# Dados de entrada do programa

print('Bem vindo! Insira os dados necessários para o cálculo das perdas
      devido à propagação atmosférica.')
freq = float(input('Digite a frequência em GHz: '))
potencia_antena_1 = float(input('Informe a potência da Antena Tx em dBm:
                                '))
ganho_antena_1 = float(input('Informe o Ganho da Antena Tx em dBi: '))
ganho_antena_2 = float(input('Informe o ganho da Antena Rx em dBi: '))
print('Informe as coordenadas dos pontos que estão localizadas as
      antenas:')
lat1 = float(input('Digite a latitude decimal da antena Tx: '))
lon1 = float(input('Digite a longitude decimal da antena Tx: '))
lat2 = float(input('Digite a latitude decimal da antena Rx: '))
lon2 = float(input('Digite a longitude decimal da antena Rx: '))
distenlace = calculos.dist(lat1, lon1, lat2, lon2)
print("A distância entre as duas torres em km é: ", distenlace, " km")
densidade_vapor = float(input("Digite a densidade do vapor de água em
                              kg/m³: "))
intensidade_chuva = float(input('Digite a intensidade de chuva excedida
                                durante 0,01% do tempo em mm/h: '))
potencia_de_limiar = float(input('Digite a potência limiar de recepção do
                                equipamento em dBm: '))
comprimento_dos_cabos = float(input('Digite o comprimento dos cabos para
                                    conectar a antena m: '))
perda_nos_cabos = float(input("Digite a perda nos cabos em dB/m: "))
polarizacao = input('Informe o tipo de polarização do enlace:\n'
                    '1 - Horizontal\n'
                    '2 - Vertical\n'
                    '3 - Circular\n'
                    '4 - Linear\n')
comp_de_onda = 3 * (10**8) / freq

```



```
elif polarizacao == '3' or polarizacao == '4':
    angulo = input(float('Digite o ângulo de elevação do trajeto em
                        graus: '))
    kcl = atenuacaochuva.k_circular_e_linear(kh, kv, angulo)
    alfa = atenuacaochuva.alfa_circular_e_linear(kh, kv, kcl, av, ah,
        angulo)
    caminho_efetivo = atenuacaochuva.caminho_efetivo(distenlace,
        intensidade_chuva, alfa, kcl)
    atenuacao_chuva = atenuacaochuva.at_especifica_chuva(alfa, kcl,
        intensidade_chuva, caminho_efetivo)

    print('A atenuação no enlace devido as chuvas é de ', atenuacao_chuva,
        'dB')

atenuacao_cabos = comprimento_dos_cabos * perda_nos_cabos
atenuacao_total = at_pela_atmosfera + atenuacao_chuva + atenuacao_cabos
print('A atenuação total do sistema é de ', atenuacao_total, 'dB')

potencia_de_recepcao = potencia_antena_1 + ganho_antena_1 + ganho_antena_2
                    - atenuacao_total
print('A potência de recepção do sistema é ', potencia_de_recepcao, 'dBm')

margem_do_enlace = potencia_de_recepcao - potencia_de_limiar
print('A margem do enlace é de ', margem_do_enlace, 'dB')
```

**ANEXO A – COEFICIENTES PARA CÁLCULO DA ATENUAÇÃO ESPECÍFICA
DAS CHUVAS**

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0.0000259	0.9691	0.0000308	0.8592
1.5	0.0000443	1.0185	0.0000574	0.8957
2	0.0000847	1.0664	0.0000998	0.9490
2.5	0.0001321	1.1209	0.0001464	1.0085
3	0.0001390	1.2322	0.0001942	1.0688
3.5	0.0001155	1.4189	0.0002346	1.1387
4	0.0001071	1.6009	0.0002461	1.2476
4.5	0.0001340	1.6948	0.0002347	1.3987
5	0.0002162	1.6969	0.0002428	1.5317
5.5	0.0003909	1.6499	0.0003115	1.5882
6	0.0007056	1.5900	0.0004878	1.5728
7	0.001915	1.4810	0.001425	1.4745
8	0.004115	1.3905	0.003450	1.3797
9	0.007535	1.3155	0.006691	1.2895
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
11	0.01772	1.2140	0.01731	1.1617
12	0.02386	1.1825	0.02455	1.1216
13	0.03041	1.1586	0.03266	1.0901
14	0.03738	1.1396	0.04126	1.0646
15	0.04481	1.1233	0.05008	1.0440
16	0.05282	1.1086	0.05899	1.0273
17	0.06146	1.0949	0.06797	1.0137
18	0.07078	1.0818	0.07708	1.0025
19	0.08084	1.0691	0.08642	0.9930
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
21	0.1032	1.0447	0.1063	0.9771
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700
23	0.1286	1.0214	0.1284	0.9630
24	0.1425	1.0101	0.1404	0.9561
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
27	0.1884	0.9780	0.1813	0.9349
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
29	0.2224	0.9580	0.2124	0.9203
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
31	0.2588	0.9392	0.2465	0.9055
32	0.2778	0.9302	0.2646	0.8981
33	0.2972	0.9214	0.2833	0.8907
34	0.3171	0.9129	0.3026	0.8834
35	0.3374	0.9047	0.3224	0.8761
36	0.3580	0.8967	0.3427	0.8690
37	0.3789	0.8890	0.3633	0.8621
38	0.4001	0.8816	0.3844	0.8552
39	0.4215	0.8743	0.4058	0.8486
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
41	0.4647	0.8605	0.4492	0.8357
42	0.4865	0.8539	0.4712	0.8296
43	0.5084	0.8476	0.4932	0.8236
44	0.5302	0.8414	0.5153	0.8179
45	0.5521	0.8355	0.5375	0.8123
46	0.5738	0.8297	0.5596	0.8069
47	0.5956	0.8241	0.5817	0.8017
48	0.6172	0.8187	0.6037	0.7967
49	0.6386	0.8134	0.6255	0.7918
50	0.6600	0.8084	0.6472	0.7871
51	0.6811	0.8034	0.6687	0.7826
52	0.7020	0.7987	0.6901	0.7783
53	0.7228	0.7941	0.7112	0.7741
54	0.7433	0.7896	0.7321	0.7700
55	0.7635	0.7853	0.7527	0.7661
56	0.7835	0.7811	0.7730	0.7623
57	0.8032	0.7771	0.7931	0.7587
58	0.8226	0.7731	0.8129	0.7552
59	0.8418	0.7693	0.8324	0.7518
60	0.8606	0.7656	0.8515	0.7486
61	0.8791	0.7621	0.8704	0.7454
62	0.8974	0.7586	0.8889	0.7424
63	0.9153	0.7552	0.9071	0.7395
64	0.9328	0.7520	0.9250	0.7366
65	0.9501	0.7488	0.9425	0.7339
66	0.9670	0.7458	0.9598	0.7313
67	0.9836	0.7428	0.9767	0.7287
68	0.9999	0.7400	0.9932	0.7262

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
69	1.0159	0.7372	1.0094	0.7238
70	1.0315	0.7345	1.0253	0.7215
71	1.0468	0.7318	1.0409	0.7193
72	1.0618	0.7293	1.0561	0.7171
73	1.0764	0.7268	1.0711	0.7150
74	1.0908	0.7244	1.0857	0.7130
75	1.1048	0.7221	1.1000	0.7110
76	1.1185	0.7199	1.1139	0.7091
77	1.1320	0.7177	1.1276	0.7073
78	1.1451	0.7156	1.1410	0.7055
79	1.1579	0.7135	1.1541	0.7038
80	1.1704	0.7115	1.1668	0.7021
81	1.1827	0.7096	1.1793	0.7004
82	1.1946	0.7077	1.1915	0.6988
83	1.2063	0.7058	1.2034	0.6973
84	1.2177	0.7040	1.2151	0.6958
85	1.2289	0.7023	1.2265	0.6943
86	1.2398	0.7006	1.2376	0.6929
87	1.2504	0.6990	1.2484	0.6915
88	1.2607	0.6974	1.2590	0.6902
89	1.2708	0.6959	1.2694	0.6889
90	1.2807	0.6944	1.2795	0.6876
91	1.2903	0.6929	1.2893	0.6864
92	1.2997	0.6915	1.2989	0.6852
93	1.3089	0.6901	1.3083	0.6840
94	1.3179	0.6888	1.3175	0.6828
95	1.3266	0.6875	1.3265	0.6817
96	1.3351	0.6862	1.3352	0.6806
97	1.3434	0.6850	1.3437	0.6796
98	1.3515	0.6838	1.3520	0.6785
99	1.3594	0.6826	1.3601	0.6775
100	1.3671	0.6815	1.3680	0.6765
120	1.4866	0.6640	1.4911	0.6609
150	1.5823	0.6494	1.5896	0.6466
200	1.6378	0.6382	1.6443	0.6343
300	1.6286	0.6296	1.6286	0.6262
400	1.5860	0.6262	1.5820	0.6256
500	1.5418	0.6253	1.5366	0.6272

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
600	1.5013	0.6262	1.4967	0.6293
700	1.4654	0.6284	1.4622	0.6315
800	1.4335	0.6315	1.4321	0.6334
900	1.4050	0.6353	1.4056	0.6351
1 000	1.3795	0.6396	1.3822	0.6365