

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

FELIPE FRANCO MARTINS

**Implementação do cálculo do coeficiente de atenuação baseado nas recomendações ITU-R
P.676-13 e 838-3.**

São João da Boa Vista

2024

Felipe Franco Martins

**Implementação do cálculo do coeficiente de atenuação baseado nas recomendações ITU-R
P.676-13 e 838-3. :**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Prof^o Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

São João da Boa Vista

2024

F825i	<p>Franco Martins, Felipe</p> <p>Implementação do cálculo do coeficiente de atenuação baseado nas recomendações ITU-R P.676-13 e 838-3. / Felipe Franco Martins. -- São João da Boa Vista, 2024</p> <p>29 p. : il., tabs.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista</p> <p>Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde</p> <p>1. Telecomunicações. 2. Sistemas de comunicação de microondas. 3. Dissipação de Energia. I. Título.</p>
-------	---

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**IMPLEMENTAÇÃO DO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO
BASEADO NAS RECOMENDAÇÕES ITU-R P.676-13 E 838-3**

Aluno: Felipe Franco Martins

Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

Banca Examinadora:

- Ivan Aritz Aldaya Garde (Orientador)
- Guilherme Simon da Rosa (Examinador)
- Plinio Santini Dester (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 29 de novembro de 2024

Dedico este trabalho à Deus, minha família, namorada e amigos, agradecendo por nunca desistirem de me apoiar, sendo a inspiração crucial para minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada acadêmica e pessoal, tornando-a possível e significativa.

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, orientação e proteção em cada etapa desta jornada. Sou grato por todas as oportunidades e realizações que me permitiu alcançar.

Agradeço aos meus pais, Jose Renato Martins e Eni Franco Martins, pela educação de qualidade e pelo apoio incondicional que sempre me ofereceram. Sua dedicação, confiança nos meus sonhos e incentivo constante foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui. Sou profundamente grato por tudo que fizeram por mim.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde, pela orientação, paciência e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sempre disposto a compartilhar seu conhecimento e a me guiar.

Sou grato também aos professores que gentilmente aceitarem compor a banca e dedicarem seu tempo para avaliar este trabalho.

À minha namorada, Laura Fatobene, que esteve ao meu lado nessa trajetória. Sua presença, apoio e compreensão foram fundamentais para me manter motivado e focado. Obrigado por ser minha parceira, amiga e um pilar tão importante na minha vida.

Aos amigos com quem dividi a moradia Leonardo Mendes, Luis Tapia, Renam Bairral e Thierry Ronchi, meu muito obrigado por compartilharem comigo tantos momentos, por estarem presentes nos dias bons e difíceis, e por serem uma fonte constante de apoio e motivação.

Aos amigos e amigas, Aime Jordan, Arthur Terra, Enzo Costa, Gabriel Tagliaferro, Larissa Passos, Leonardo Bologna, Maria Eduarda, Matheus Toledo, Raphael Parreira, Stephanie Lima, Thainara Pieroni, Thayane Devecchi e Vitor Moraes, que me acompanharam ao longo dos anos, compartilho minha gratidão pelas risadas, experiências e por todo o incentivo durante essa jornada.

Por fim, a todas as pessoas que cruzaram meu caminho ao longo desta jornada, agradeço por terem contribuído com suas experiências, perspectivas e lições, enriquecendo não apenas minha formação acadêmica, mas também minha vida pessoal.

*“A mente que se transforma na ciência não voltará jamais a sua forma original.”
(Marie Curie)*

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aborda a atenuação de sinal em sistemas de alta frequência (*millimeter wave*, mmW), com foco nas condições atmosféricas que impactam a propagação em ondas milimétricas. O estudo realiza uma análise detalhada dos efeitos atmosféricos em diferentes faixas de frequência, buscando compreender o impacto dos mecanismos de atenuação e identificar os fatores dominantes em cada caso. A pesquisa inclui a revisão das perdas de propagação por espaço livre (*Free Space Path Loss*, FSPL) e utiliza as equações das recomendações ITU-R P.676-13 e P.838-3, cobrindo frequências de 1 a 1000 GHz. Os parâmetros definidos nas normas foram aplicados para garantir a precisão e a validação dos resultados. As simulações e análises foram realizadas em linguagem Python, permitindo uma avaliação comparativa entre os diferentes mecanismos de atenuação. Os resultados mostram que a FSPL é o fator dominante em todas as faixas de frequência para distâncias de alguns quilômetros, enquanto a absorção se torna relevante na faixa de 80 GHz em enlaces de micro-ondas. Este trabalho contribui para o entendimento da propagação de sinais em condições atmosféricas adversas, fornecendo subsídios para o planejamento e dimensionamento de sistemas de comunicação em ondas milimétricas.

PALAVRAS-CHAVE: atenuação de sinal; ondas milimétricas; condições atmosféricas; absorção por oxigênio; absorção por vapor de água; perdas por espaço livre; chuvas moderadas e fortes; ITU-R P.676-13; ITU-R P.838-3.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis addresses signal attenuation in high-frequency systems (millimeter wave, mmW), focusing on atmospheric conditions that impact millimeter wave propagation. The study provides a detailed analysis of atmospheric effects across different frequency ranges, aiming to understand the impact of attenuation mechanisms and identify the dominant factors in each case. The research includes a review of Free Space Path Loss (FSPL) and utilizes the equations from ITU-R recommendations P.676-13 and P.838-3, covering frequencies from 1 to 1000 GHz. The parameters defined in the standards were applied to ensure accuracy and validation of the results. Simulations and analyses were conducted using the Python programming language, allowing a comparative evaluation of the different attenuation mechanisms. The results show that FSPL is the dominant factor across all frequency ranges for distances of several kilometers, while absorption becomes significant in 80 GHz microwave links. This work contributes to the understanding of signal propagation in adverse atmospheric conditions, providing insights for the planning and design of millimeter-wave communication systems.

KEYWORDS: signal attenuation; millimeter waves; atmospheric conditions; oxygen absorption; water vapor absorption; free space path loss; moderate and heavy rain; ITU-R P.676-13; ITU-R P.838-3.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Aplicações para diferentes faixas de frequência	14
Figura 2	FSPL para 6, 60, 80 e 185 GHz	23
Figura 3	Atenuação específica obtida por meio da biblioteca itur nas frequências de 0 a 1.000 GHz.	24
Figura 4	Valores de γ para chuvas moderadas e fortes	25
Figura 5	Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 6 GHz.	25
Figura 6	Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 60 GHz.	26
Figura 7	Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 80 GHz.	27
Figura 8	Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 185 GHz.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros considerados nos cálculos de atenuação.	20
Tabela 2 – Coeficientes a_j , b_j , c_j , m e c para o cálculo de k_h	21
Tabela 3 – Coeficientes a_j , b_j , c_j , m_α e c_α para o cálculo de α_h	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

dB/km: Decibel por Quilômetro

EIRP: *Effective Isotropic Radiated Power* (Potência Isotrópica Radiada Efetiva)

ETSI: *European Telecommunications Standards Institute*

FSPL: *Free Space Path Loss* (Perda de Espaço Livre)

GHz: Gigahertz

H₂O: Água (Vapor de Água)

mmW: Millimeter Wave (Onda Milimétrica)

O₂: Oxigênio

R: Taxa de Precipitação

TCC: Trabalho de Conclusão de Curso

UNESP: Universidade Estadual Paulista

WPANs: *Wireless Personal Area Networks* (Redes Pessoais sem Fio)

LISTA DE SÍMBOLOS

B	: Largura de banda (MHz)
c	: Velocidade da luz no vácuo (m/s)
d	: Distância (m ou km)
f	: Frequência (Hz ou GHz)
P	: Pressão atmosférica (hPa)
R	: Taxa de Precipitação (mm/h)
T	: Temperatura (°C)
α	: Expoente da atenuação por chuva
γ	: Atenuação específica (dB/km)
λ	: Comprimento de onda (m)
k	: Coeficiente de atenuação por chuva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Exploração de Novas Faixas de Frequência e Desafios na Propagação de Ondas Milimétricas	14
1.2	Perdas por espaço livre (FSPL)	15
1.3	Absorção atmosférica	15
1.4	Desafios na Análise de Atenuação dos sinais em sistemas mmW	16
1.5	Contribuições	16
1.6	Estrutura	17
2	MATERIAIS E MÉTODOS	18
2.1	Perdas do espaço livre	18
2.2	Perdas por absorção atmosférica	19
2.2.1	Perdas por absorção gasosa	19
2.2.2	Atenuação devido a chuvas	21
2.3	Avaliação numérica dos mecanismos de atenuação	22
3	RESULTADOS	23
3.1	Perdas de espaço livre	23
3.2	Perdas de absorção atmosférica	24
3.2.1	Perdas de absorção gasosa	24
3.2.2	Perdas por chuvas	24
3.3	Comparação entre atenuação atmosférica e FSPL	25
4	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

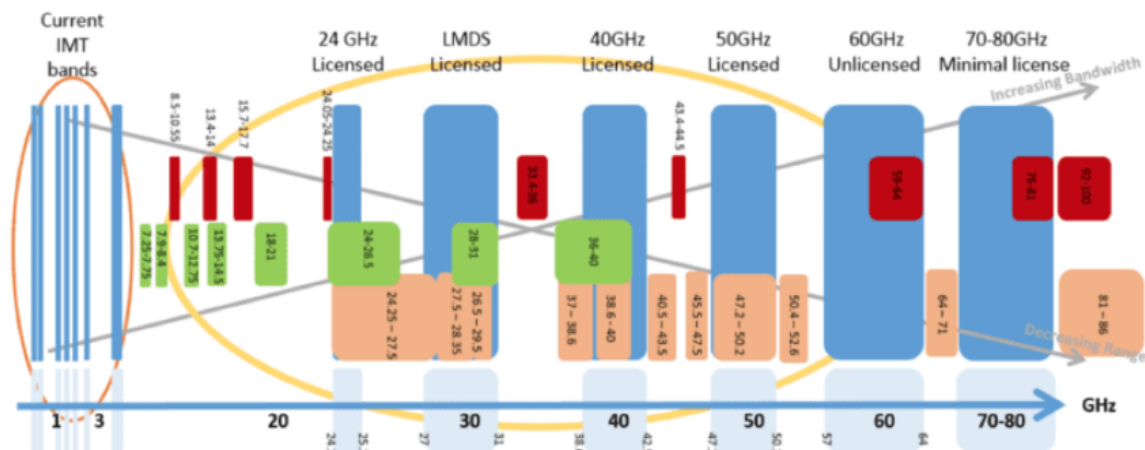
1.1 EXPLORAÇÃO DE NOVAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA E DESAFIOS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS

O mercado atual apresenta uma crescente demanda de novos serviços e aplicações utilizando grandes volumes de dados que tendem a saturar as faixas de frequências mais baixas e largas de banda disponíveis [Obile 2016]. Por isso, novas faixas estão sendo exploradas na região do espectro de ondas milimétrica (*millimeter wave*, mmW), o que permite o aumento da largura de banda utilizada pelos novos sistemas. As bandas V (50 GHz a 75 GHz), e W (75 GHz a 110 GHz), aprimorarão aplicações como redes pessoais sem fio (*Wireless Personal Area Networks-WPANS*) de curto alcance e alta velocidade, transmissão de vídeo de alta qualidade em tempo real, a banda E (80 GHz) utilizada para enlaces ponto a ponto de microondas, radares automotivos (76 GHz a 81 GHz) e imagens por RF (94 GHz, 140 GHz), ou telemedicina [Wang et al. 2018].

Além das mencionadas, existem novas aplicações como os sistemas de radar veiculares e aeroportuários projetados para evitar colisões devem ser robustos a interferência e devem ser compatíveis com as normas estabelecidas pela ITU, ETSI e Anatel, as quais atribuíram a faixa 76-81GHz para radares automotivos [Commission et al. 2017] [Series 2014].

Conforme ilustrado na Figura 1, existem diferentes aplicações para diferentes frequências. As bandas de frequência mais baixas, entre 1 e 6 GHz, estão associadas às bandas IMT (*International Mobile Telecommunications*), que são amplamente utilizadas para aplicações móveis e de telecomunicações devido ao seu alcance relativamente longo e baixa atenuação. À medida que avançamos para frequências mais altas, como 24 GHz, 40 GHz, e até 70-80 GHz, o espectro é dividido em bandas licenciadas e bandas de licença mínima. Essas faixas de frequência mais elevadas, como as de 60 GHz e acima, oferecem uma largura de banda crescente, ideal para transmissão de grandes quantidades de dados, mas possuem um alcance menor e sofrem mais com a atenuação.

Figura 1 – Aplicações para diferentes faixas de frequência



Fonte: [Spectrum Matters 2019]

Para um correto dimensionamento do funcionamento dos sistemas de telecomunicações na faixa de 1 a 1000 GHz, é necessário uma caracterização das propriedades de propagação atmosférica das ondas eletromagnéticas na região espectral de ondas mmW e Terahertz. A principal característica da transmissão atmosférica a baixa altitude é a atenuação, a qual depende de fatores como perda por espaço livre (*Free Space Path Loss*, FSPL) e absorção atmosférica.

A alta atenuação atmosférica, embora geralmente considerada uma desvantagem, pode ser benéfica em certos contextos, pois permite um maior confinamento da radiação eletromagnética, reduzindo a interferência em ambientes de alta densidade.

Diversos estudos destacam a absorção na faixa de 60 GHz como um fator que limita enlaces de longa distância [Rappaport et al. 2013], [Singh et al. 2015], [Wells 2009]; no entanto, sem uma análise abrangente que considere todos os fatores de atenuação, não está claramente definido o peso relativo de cada um deles em diferentes cenários de aplicação.

1.2 PERDAS POR ESPAÇO LIVRE (FSPL)

A perda de espaço livre (*Free Space Path Loss*, FSPL) é um conceito fundamental em comunicações sem fio, descrevendo a atenuação natural do sinal conforme ele se propaga em linha reta no espaço livre, sem a presença de obstáculos. Essa perda depende diretamente da distância entre o transmissor e o receptor e da frequência do sinal. À medida que a frequência aumenta, a perda de espaço livre também aumenta, o que é especialmente relevante para comunicações em ondas milimétricas, onde as distâncias de comunicação viáveis são reduzidas devido à maior atenuação [Balanis 2016].

A equação que rege a FSPL mostra que a atenuação aumenta quadraticamente com a distância e a frequência, o que pode impactar severamente a eficácia da transmissão de dados em longas distâncias em sistemas mmW. Portanto, ao projetar sistemas de comunicação para operar nessas faixas de frequência, é essencial levar em conta a FSPL para garantir que a potência do sinal recebido seja suficiente para uma comunicação eficiente e confiável.

1.3 ABSORÇÃO ATMOSFÉRICA

A absorção do oxigênio é um dos fatores na atenuação de sinais eletromagnéticos. Em torno de 60 GHz, as moléculas de oxigênio (O_2) ressoam, resultando em uma absorção significativa do sinal. Essa ressonância ocorre devido à interação entre o campo eletromagnético e as transições rotacionais do oxigênio, o que provoca uma elevada atenuação [Rappaport et al. 2013]. Esse fenômeno contribui para tornar essa faixa de frequência menos adequada para comunicações de longa distância, mas potencialmente vantajosa em cenários onde é desejável minimizar interferências entre sistemas próximos.

Assim como o oxigênio, o vapor de água também contribui para a atenuação de sinais em frequências elevadas. A absorção por vapor de água é causada principalmente pelas transições rotacionais das moléculas de água (H_2O), que ocorrem em várias faixas de frequência, incluindo a região das ondas milimétricas. A quantidade de vapor de água na atmosfera pode resultar em variações na atenuação do

signal, que dependem das condições climáticas, como umidade relativa e temperatura [International Telecommunication Union 2022].

Além dos gases atmosféricos, diferentes condições climáticas, como chuvas leves e intensas, têm um impacto significativo na atenuação do sinal. Em particular, a chuva causa dispersão e absorção adicionais, resultando em uma atenuação maior do que a causada apenas pela presença de vapor de água. A intensidade da chuva está diretamente relacionada à magnitude da atenuação: quanto mais intensa a precipitação, maior será a perda de sinal. Em ambientes com alta pluviosidade, o desempenho de sistemas de telecomunicação que operam em ondas milimétricas pode ser consideravelmente prejudicado.

A absorção devido à chuva ocorre por conta da dispersão e absorção de ondas eletromagnéticas pelas gotas de água na atmosfera. A intensidade da atenuação aumenta diretamente com a taxa de precipitação, sendo particularmente severa durante chuvas intensas [Rec 2005]. Em regiões tropicais ou em áreas com alta pluviosidade, esse fenômeno pode causar uma degradação significativa da qualidade do sinal, mesmo em distâncias relativamente curtas.

Sistemas de telecomunicações que operam em faixas de frequência milimétrica, como aqueles usados para redes 5G, são particularmente sensíveis a esses efeitos atmosféricos. Em cenários de chuvas moderadas a fortes, a atenuação pode atingir níveis críticos, limitando a viabilidade de enlaces de longa distância. Em áreas com alta intensidade de chuva, essa perda de sinal pode comprometer a confiabilidade das comunicações.

1.4 DESAFIOS NA ANÁLISE DE ATENUAÇÃO DOS SINAIS EM SISTEMAS MMW

Um dos principais desafios na análise desses mecanismos de atenuação está na comparação entre a FSPL e a absorção, pois cada um apresenta um comportamento diferente em relação à distância. A FSPL aumenta quadraticamente com a distância, uma vez que a intensidade do sinal se dispersa proporcionalmente ao quadrado da distância percorrida. Por outro lado, a absorção atmosférica tem um comportamento exponencial, o que significa que a atenuação aumenta de forma acelerada com o aumento da distância, particularmente em frequências onde a absorção por oxigênio ou vapor de água é significativa. Esse contraste nos comportamentos torna a análise complexa, pois o fator predominante de atenuação pode mudar conforme a distância e a frequência utilizadas.

Dada essa complexidade, é essencial realizar uma análise detalhada e sistemática das diferentes contribuições para a perda de sinal em sistemas de ondas milimétricas, considerando tanto a distância quanto a frequência. Essa dinâmica variável dificulta a previsão precisa do desempenho de sistemas mmW em diferentes ambientes e configurações, especialmente para aplicações em que pequenas variações na distância e nas condições atmosféricas podem causar perdas significativas na qualidade do sinal.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Compreender os desafios associados à propagação de ondas milimétricas é fundamental para impulsionar as tecnologias emergentes em telecomunicações. A propagação dessas ondas é fortemente

influenciada por fatores como a perda por espaço livre e a absorção, causada tanto pelo vapor e gotículas de água quanto pelo oxigênio. Esses fatores podem impactar o desempenho dos sistemas de maneira diferente, dependendo da frequência utilizada e das condições operacionais. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre as perdas por espaço livre e as perdas por absorção, buscando identificar qual desses fatores representa a maior limitação em diferentes faixas de frequência e aplicações. Além disso, serão consideradas as condições meteorológicas adversas, como chuvas moderadas e intensas, para fornecer uma compreensão mais aprofundada dos desafios enfrentados em cenários reais.

1.6 ESTRUTURA

Este trabalho foi dividido em:

- **Introdução:** Na introdução foram introduzidas as diferentes contribuições de atenuação do sinal em sistemas de onda mmW. Também foi apresentado que cada fator tem sua contribuição e que cada faixa de frequência sofre diferentes níveis de atenuação.
- **Materiais e métodos:** Neste tópico vai ser abordado o equacionamento da FSPL e da absorção.
- **Resultados:** Já neste tópico irá ser mostrado os resultados obtidos com as análises dos fatores de atenuação para diferentes valores de frequência.
- **Conclusão:** E finalmente aqui será mostrado as conclusões que podemos obter do trabalho apresentado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o equacionamento das perdas de espaço livre e absorção atmosférica e introduziram-se as bibliotecas utilizadas para a sua avaliação numérica.

2.1 PERDAS DO ESPAÇO LIVRE

A fórmula da atenuação do espaço livre é obtida a partir da equação de Friis na qual relaciona a potência transmitida entre duas antenas [Balanis 2016]. Para a equação ser válida, a distância (R) precisa obedecer a seguinte condição $R > 2D^2/\lambda$, onde D é a maior dimensão da antena.

Considerando radiadores isotrópicos, a densidade de potência radiada é dada por [Balanis 2016]:

$$W_0 = e_t \cdot \frac{P_t}{4\pi R^2}, \quad (1)$$

e λ é definido por

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

No qual c é a velocidade da luz e f a frequência da onda eletromagnética.

Sendo e_t a eficiência de radiação da antena. Para uma antena diretiva, a densidade de potência nas direções de θ_t e ϕ_t pode ser escrita como:

$$W_t = \frac{P_t G_t(\theta_t, \phi_t)}{4\pi R^2} = e_t \frac{P_t D_t(\theta_t, \phi_t)}{4\pi R^2}, \quad (3)$$

onde $G_t(\theta_t, \phi_t)$ é o ganho e $D_t(\theta_t, \phi_t)$ a directividade da antena. Considerando que a área efetiva da antena receptora é relacionada com a eficiência e_r e a directividade D_r temos:

$$A_r = e_r D_r(\theta_r, \phi_r) \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right). \quad (4)$$

os subíndices t e r se referem a antena de transmissão e recepção respectivamente. A quantidade de potência recebida P_r pode ser escrita como:

$$P_r = e_r D_r(\theta_r, \phi_r) \frac{\lambda^2}{4\pi} W_t. \quad (5)$$

Por fim, chegamos na equação de Friis substituindo W_t utilizando a equação 3 e considerando o alinhamento das antenas a relação entre potência enviada e recebida:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (6)$$

Como estamos analisando as perdas de espaço livre, vamos desconsiderar o ganho das antenas e inverter a equação de Friis, encontrando a relação P_t/P_r denominada perda de espaço livre (*Free Space Path Loss*):

$$\frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2. \quad (7)$$

2.2 PERDAS POR ABSORÇÃO ATMOSFÉRICA

As perdas por absorção atmosférica podem ser classificadas em perdas por absorção gasosa e perdas causadas pela chuva. As primeiras incluem a absorção de gases, como o oxigênio e o vapor d'água (este último, embora tecnicamente não seja um gás, é tratado como tal nesse contexto). Essas perdas estão descritas de forma detalhada na norma ITU-R P.676-13 [International Telecommunication Union 2022]. Já as perdas de sinal devido à absorção pela chuva são abordadas na norma ITU-R P.838-3.

2.2.1 Perdas por absorção gasosa

Para uma melhor compreensão da atenuação devido a condições atmosféricas, foi realizada a comparação entre a contribuição do oxigênio e do vapor de água a partir da equação de atenuação específica dos gases presente na norma ITU-R P.676-13 [International Telecommunication Union 2022]. Essa equação segue a Lei de Beer, onde a atenuação é descrita por um decaimento exponencial que é descrito pelo coeficiente de atenuação específica, denotado por γ , que varia conforme a composição atmosférica e a frequência de operação.

$$\gamma = 0,1820f [N''_O(f) + N''_{H_2O}(f)] \quad (\text{dB/km}), \quad (8)$$

em que N''_O e N''_{H_2O} são as componentes imaginárias das refratividades complexas dependentes da frequência:

$$N''_O(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad \text{e} \quad N''_{H_2O}(f) = \sum_i S'_i F'_i, \quad (9)$$

sendo S_i a intensidade do pico de absorção, F_i é uma lorentziana centrada na frequência f_i e $N''_D(f)$ o alargamento de linha devido ao efeito Debye.

Para S_i , temos as equações de oxigênio (S_i) e vapor de água (S'_i) representadas abaixo:

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

e

$$S'_i = b_1 \cdot 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3.5} \cdot \exp[b_2(1 - \theta)], \quad (11)$$

onde:

- p : pressão atmosférica em hPa;
- e : pressão parcial do vapor de água em hPa;
- θ : 300 dividido pela temperatura em Kelvin

- a_n : constante espectroscópica de atenuação do oxigênio, muda para cada frequência;
- b_n : constante espectroscópica de atenuação do vapor de água, muda para cada frequência.

Em relação ao cálculo de F_i , é considerada a largura de linha Δf e o fator de correção δ :

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right]. \quad (12)$$

A largura de linha também apresenta diferença nas equações para cada gás, sendo Δf referente ao oxigênio e $\Delta f'$ ao vapor de água:

$$\Delta f = a_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{(0.8-a_4)} + 1.1 \cdot e \cdot \theta) \quad (13)$$

e

$$\Delta f' = b_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{(b_4)} + b_5 \cdot e \cdot \theta^{b_6}). \quad (14)$$

Já para o fator de correção, este só é presente quando analisamos o oxigênio (para o vapor de água é igual a zero) e é dado por:

$$\delta = (a_5 + a_6 \cdot \theta) \times 10^{-4} \cdot (p + e) \cdot \theta^{0.8}. \quad (15)$$

Por fim, na contribuição devido ao oxigênio é preciso considerar o efeito Debye. Esse efeito é mais presente nas frequências abaixo de 10 GHz (devido ao "continuum") e acima de 100 GHz (devido a contribuição do nitrogênio).

$$N_D''(f) = f \cdot p \cdot \theta^2 \left\{ \frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right\}, \quad (16)$$

no qual d representa a largura de linha do efeito Debye:

$$d = 5.6 \cdot 10^{-4} \cdot (p + e) \cdot \theta^{0.8}. \quad (17)$$

Além disso, para a realização dos cálculos, foram utilizados parâmetros como temperatura e pressão para atmosfera seca ou úmida encontrados na norma conforme a Tabela 1

Tabela 1 – Parâmetros considerados nos cálculos de atenuação.

Parâmetro	Variável	Valor	Unidade
Pressão atmosférica	p	1013.25	hPa
Temperatura	T	15	°C
Densidade atmosférica (atm. umi .)	-	7.5	g/m ³
Densidade atmosférica (atm. seca)	-	0	g/m ³

Fonte: Norma ITU-R P.676-13.

2.2.2 Atenuação devido a chuvas

A atenuação específica para condições climáticas severas, γ_R (dB/km), é obtida a partir da taxa de precipitação P (mm/h), utilizando a relação de lei de potência presente na norma ITU-R P.838-3 [International Telecommunication Union 2005]. Essa equação também segue a Lei de Beer, descrevendo o decaimento exponencial da intensidade do sinal com o aumento da distância, sendo o coeficiente de atenuação γ_R o fator que controla esse decaimento em função da intensidade da precipitação.

$$\gamma_R = kP^\alpha \quad (18)$$

Os valores dos coeficientes k e α são determinados como funções da frequência, f (GHz), no intervalo de 1 a 1.000 GHz, a partir das seguintes equações, que foram desenvolvidas a partir de ajustes de curva aos coeficientes da lei de potência derivados de cálculos de dispersão:

$$k = \exp \left(\sum_{j=1}^4 \left[a_j \exp \left(- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right) \right] \right) + m_k \log f + c_k \quad (19)$$

$$\alpha = \exp \left(\sum_{j=1}^5 \left[a_j \exp \left(- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right) \right] \right) + m_\alpha \log f + c_\alpha \quad (20)$$

onde:

- f : frequência (GHz)
- k : pode ser k_H (polarização horizontal) ou k_V (polarização vertical)
- α : pode ser α_H (polarização horizontal) ou α_V (polarização vertical)

Os valores das constantes para os coeficiente k_H e α_H estão presentes nas Tabelas 2 e 3 respectivamente para polarização horizontal. Também estão presentes na norma os coeficientes k_V e α_V com suas respectivas constantes para polarização vertical.

Tabela 2 – Coeficientes a_j , b_j , c_j , m e c para o cálculo de k_h

j	a_j	b_j	c_j	m	c
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

Fonte: Norma ITU-R P.838-3.

Tabela 3 – Coeficientes a_j , b_j , c_j , m_α e c_α para o cálculo de α_h

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

Fonte: Norma ITU-R P.838-3.

2.3 AVALIAÇÃO NUMÉRICA DOS MECANISMOS DE ATENUAÇÃO

Os modelos semiempíricos descritos pelas normas ITU-R P.676-13 e ITU-R P.838-3 são relativamente complexos. No entanto, já existem bibliotecas consolidadas em Python que facilitam a estimativa das perdas conforme essas recomendações. Em particular, utilizaremos as seguintes bibliotecas:

- itur
- cartopy
- itur.models.itu676
- itur.models.itu838
- numpy
- matplotlib

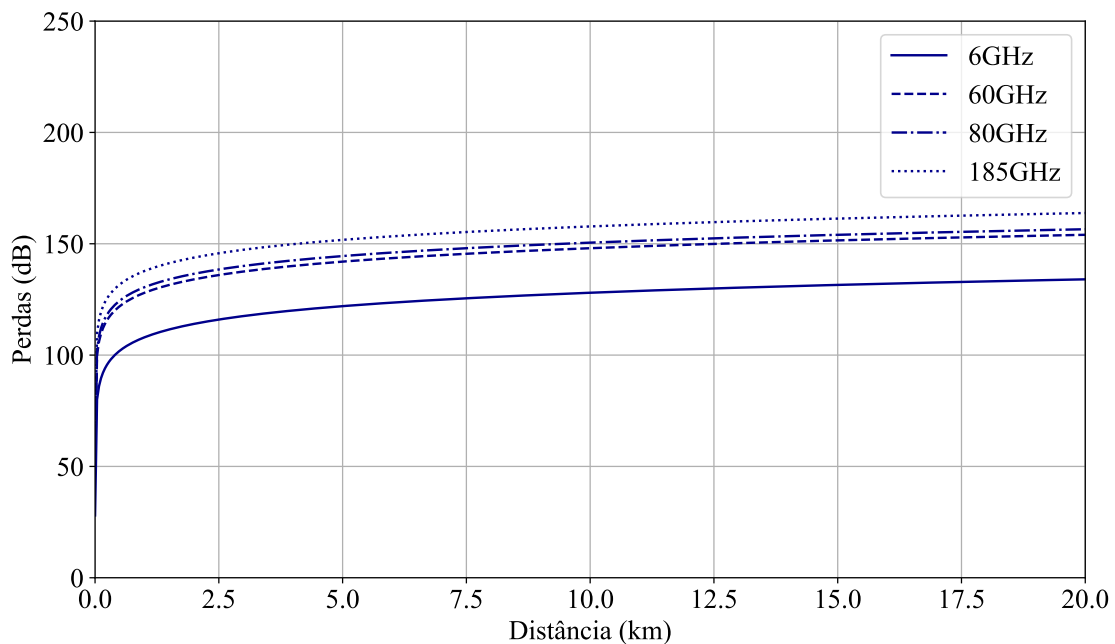
3 RESULTADOS

Para a análise comparativa, foram selecionadas diferentes frequências, cada uma associada a uma aplicação específica. A frequência de 6 GHz foi escolhida por ser amplamente utilizada na implementação do 5G. A faixa de 60 GHz foi incluída devido ao pico de absorção do oxigênio nessa região do espectro. A frequência de 80 GHz, que corresponde à banda E, também foi considerada, abrangendo uma faixa destinada a aplicações como radares. Por fim, a frequência de 185 GHz foi selecionada por representar o primeiro vale após os picos de absorção, além de exemplificar uma frequência mais alta. Com esses valores, serão analisados os diferentes níveis FSPL e as contribuições da absorção.

3.1 PERDAS DE ESPAÇO LIVRE

Utilizando as equações apresentadas na Subsecção 2.1, é possível calcular a contribuição da FSPL em cada uma das aplicações descritas acima, representada pela Figura 2.

Figura 2 – FSPL para 6, 60, 80 e 185 GHz



Fonte: Produção do próprio autor.

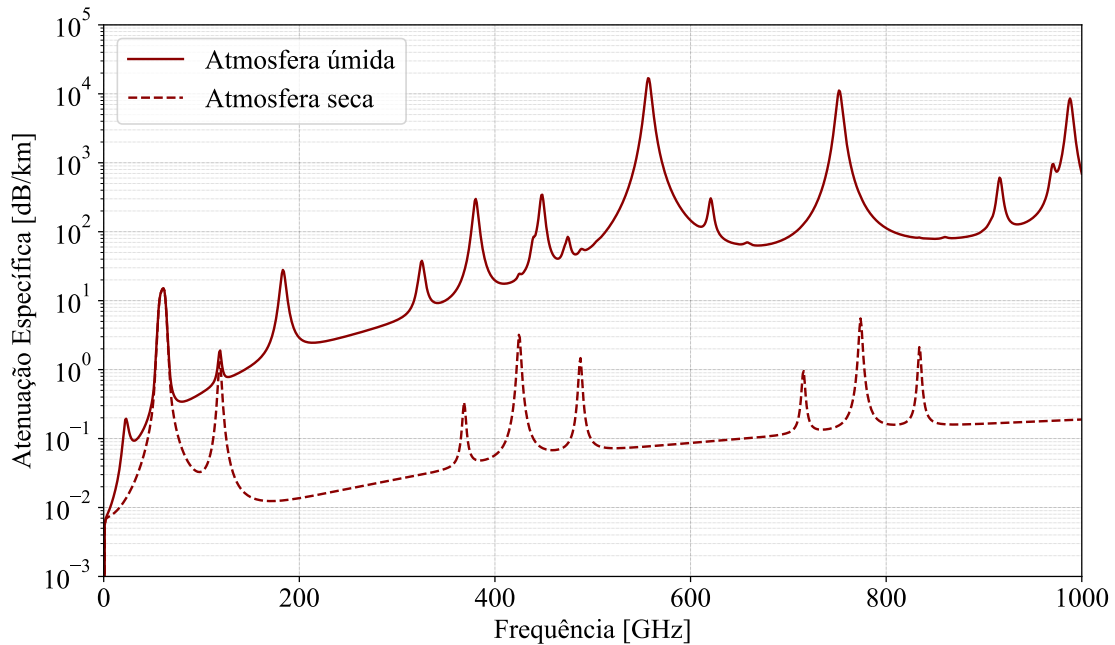
Nos resultados apresentados, observa-se claramente que, conforme a frequência aumenta, a contribuição da perda por espaço livre também se eleva de maneira significativa, conforme o esperado teoricamente. Mesmo para frequências mais baixas, como 6 GHz, as perdas já atingem cerca de 100 dB, o que indica a relevância deste fator mesmo em sistemas que operam em bandas inferiores.

3.2 PERDAS DE ABSORÇÃO ATMOSFÉRICA

3.2.1 Perdas de absorção gasosa

Com a utilização da biblioteca *itur*, foi possível reproduzir o comportamento da absorção atmosférica descrito na recomendação ITU-R P.676-13 [International Telecommunication Union 2022]. Os resultados indicam que a atenuação específica varia consideravelmente de acordo com a presença de vapor de água e oxigênio na atmosfera, o que é particularmente relevante em frequências elevadas. Na análise entre 0 a 1.000 GHz, percebe-se que em frequências acima de 60 GHz, a contribuição da absorção atmosférica se intensifica significativamente, especialmente em condições de alta umidade. As curvas obtidas para atmosfera úmida e seca confirmam as previsões teóricas, com a atmosfera úmida apresentando maiores valores de atenuação devido à presença de vapor de água.

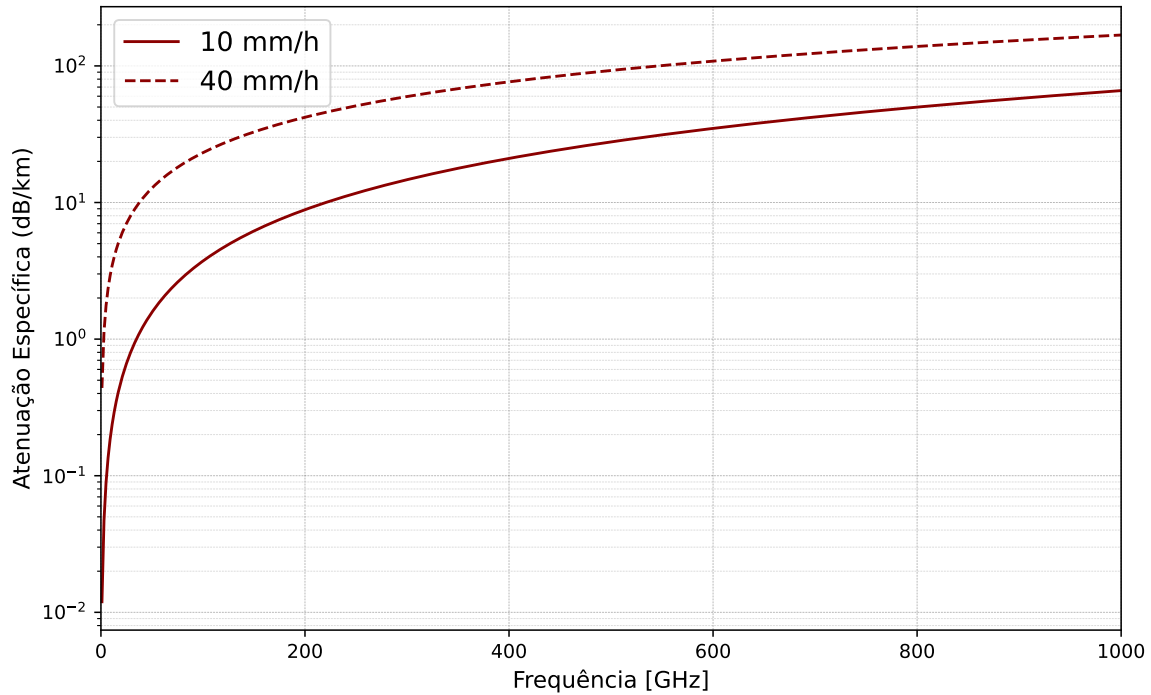
Figura 3 – Atenuação específica obtida por meio da biblioteca *itur* nas frequências de 0 a 1.000 GHz.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.2 Perdas por chuvas

Em aplicações outdoor, as chuvas tem grande influência na atenuação do sinal e, conforme descritas na subsecção 2.2.2 a frequência da aplicação determina o quão impactante é a atenuação. O comportamento de γ na polarização horizontal, considerando valores médios em mm h^{-1} de chuvas moderadas e fortes é representado na Figura 4.

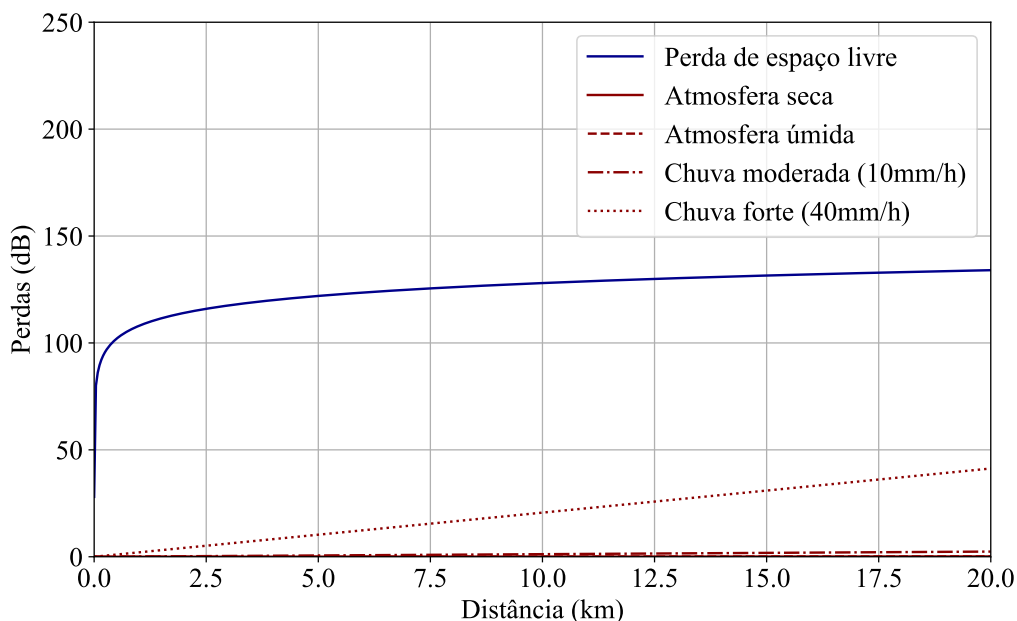
Figura 4 – Valores de γ para chuvas moderadas e fortes

Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA E FSPL

A frequência de 6 GHz, amplamente utilizada em redes 5G, apresenta um comportamento onde as perdas por espaço livre dominam completamente em comparação com a atenuação devido aos gases e chuvas. Como ilustrado na Figura 5, as perdas de espaço livre são muito mais significativas, enquanto a contribuição da atenuação específica é quase nula mesmo considerando condições de chuvas fortes.

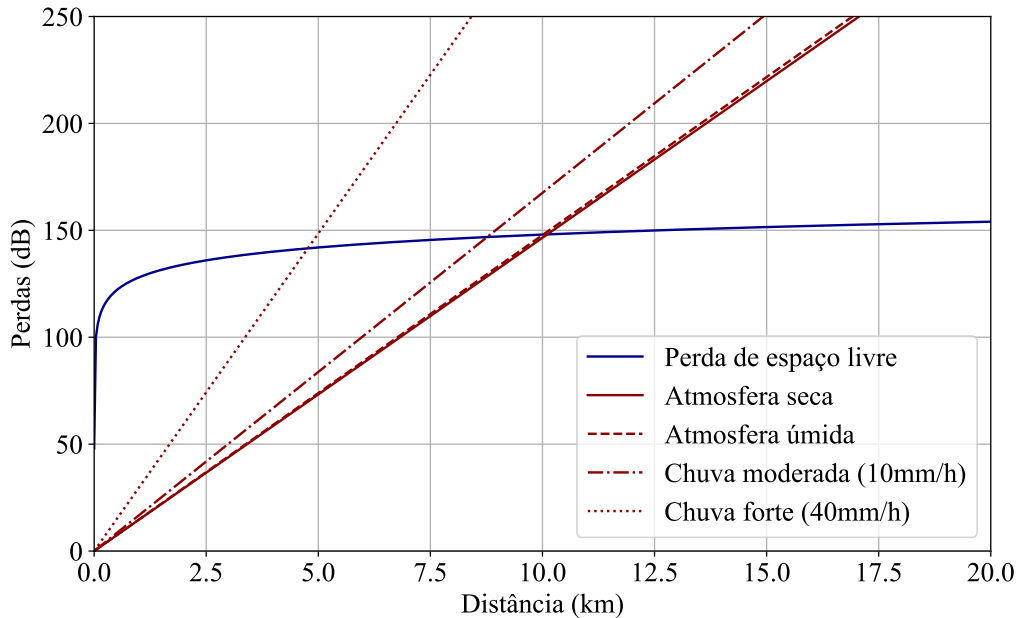
Figura 5 – Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 6 GHz.



Fonte: Produção do próprio autor.

No caso da frequência de 60 GHz, conhecida por coincidir com um pico de absorção de oxigênio, observa-se uma interseção entre as curvas de perda por espaço livre e atenuação devido a absorção em torno de 10 km e, em situações de chuva forte essa intersecção ocorre por volta dos 5 km conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 60 GHz.

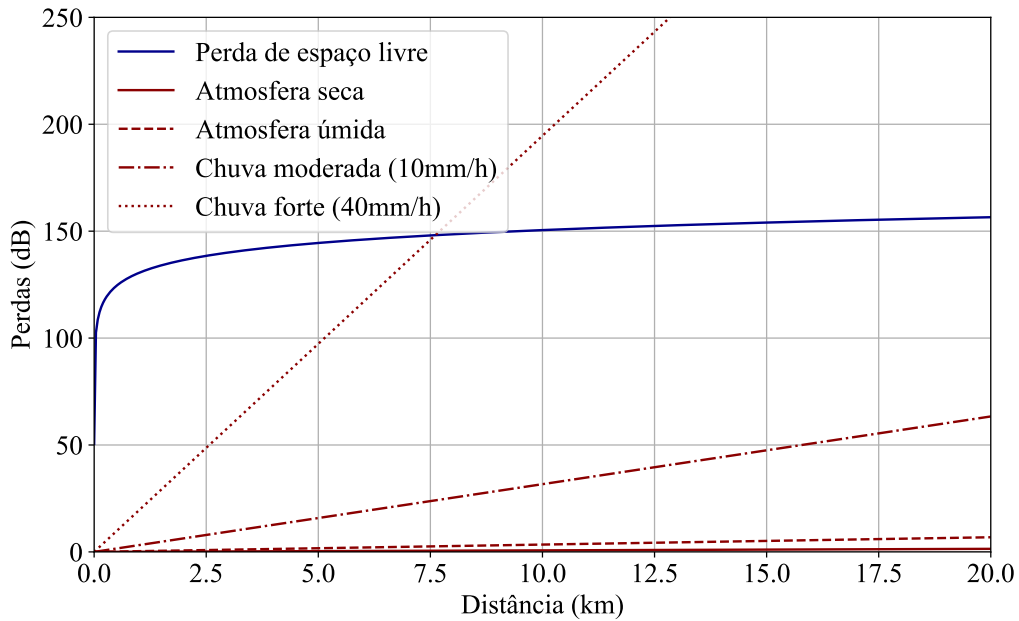


Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise dos resultados para a faixa de 80 GHz, observa-se que a atenuação é fortemente influenciada tanto pela perda de espaço livre quanto pelos efeitos atmosféricos, incluindo a absorção por vapor de água e a precipitação. A perda de espaço livre se destaca como o fator dominante nas distâncias mais curtas. No entanto, em distâncias superiores a aproximadamente 7,5 km, a absorção atmosférica devido a chuvas começa a ter uma contribuição significativa na atenuação total do sinal, superando as perdas de espaço livre.

Nota-se que, apesar da frequência ser maior em relação ao gráfico de 60 GHz, os efeitos atmosféricos são menos impactantes em relação a Figura 6. Isso ocorre devido a absorção do oxigênio que aumenta os níveis de atenuação nas condições úmida e seca de atmosfera.

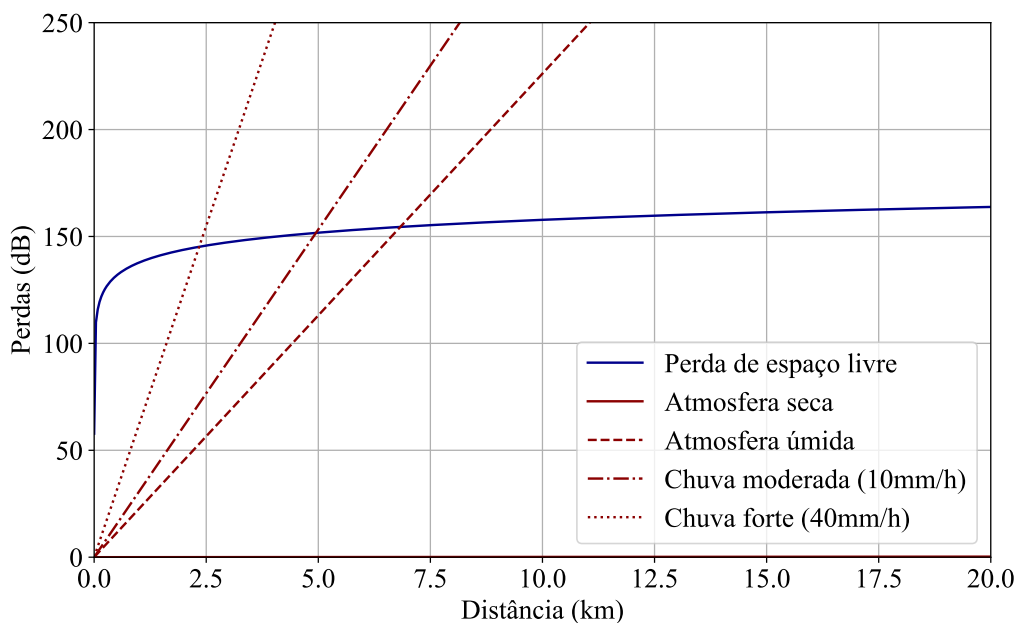
Figura 7 – Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 80 GHz.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na análise da faixa de 185 GHz, percebe-se que a atenuação do sinal é extremamente sensível aos efeitos atmosféricos, com uma acentuada contribuição de fatores como a absorção por vapor de água e as condições de chuva. A partir dos resultados, nota-se que, em distâncias curtas (até cerca de 2 km), a perda de espaço livre ainda predomina. No entanto, conforme a distância aumenta, a absorção atmosférica com chuvas fortes se torna o principal fator de atenuação podendo ultrapassar 200 dB de perdas.

Figura 8 – Comparação entre o FSPL e a Atenuação específica em 185 GHz.



Fonte: Produção do próprio autor.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, constatou-se que a FSPL permanece como o fator predominante na atenuação de sinais eletromagnéticos em todas as faixas de frequência analisadas, especialmente quando se consideram as distâncias típicas das aplicações de cada faixa. Observou-se, também, que a atenuação aumenta com o crescimento da frequência, comportamento previsto e consistente com a teoria.

É importante destacar que, embora a FSPL seja o fator dominante na atenuação de sinais, as perdas por absorção tornam-se mais significativas à medida que a frequência aumenta, sendo especialmente impactadas por condições climáticas adversas, como chuvas intensas. Na faixa de 60 GHz, observa-se uma contribuição da absorção pelo oxigênio, porém, diferente do indicado em diversos estudos, esse efeito não chega a ser dominante.

Em relação às aplicações específicas, verificou-se que na banda E, utilizada em enlaces ponto a ponto de micro-ondas, a absorção atmosférica assume uma relevância considerável. Nesse caso, a absorção pode impactar de maneira significativa a propagação do sinal, tornando-se um desafio adicional para o dimensionamento e confiabilidade dos enlaces nessa faixa de frequência.

O estudo também revelou que a precipitação tem um impacto substancial no comportamento da atenuação por chuvas. Em condições de chuva intensa, com taxas de precipitação superiores a 50 mm/h, a atenuação específica devido à chuva pode se tornar um fator limitante considerável. Esse fenômeno deve ser levado em conta no planejamento de enlaces de telecomunicações em regiões sujeitas a chuvas severas, uma vez que esses eventos podem ocorrer ocasionalmente.

Certamente uma possibilidade de trabalhos futuros seria o design de um enlace ponto a ponto na banda E, utilizando os resultados aqui apresentados para visualizar na prática as contribuições de cada fator de atenuação. Além disso, estudar a diferença de polarizações nas condições de chuva moderada e forte a fim de verificar qual a melhor opção ao implementar um enlace em uma região chuvosa.

Outra extensão relevante deste trabalho seria a análise e apresentação gráfica das distâncias críticas para cada valor de frequência analisado. Essa distância corresponde ao ponto em que a absorção atmosférica começa a se equiparar à FSPL, representando uma transição importante na predominância dos fatores de atenuação. Esse tipo de gráfico poderia fornecer uma visão mais prática e aplicada, auxiliando no planejamento de enlaces de telecomunicações e na escolha adequada de frequências para diferentes cenários e aplicações.

REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. [S.l.]: John wiley & sons, 2016.
- COMMISSION, F. C. et al. Radar services in the 76-81 GHz band. **Washington, DC, USA, Tech. Rep. ET Docket**, n. 15-26, 2017.
- International Telecommunication Union. **ITU-R P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods**. [S.l.], 2005. Accessed: 2024-10-16. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en>>.
- International Telecommunication Union. **ITU-R P.676-13: Attenuation by atmospheric gases and related effects**. [S.l.], 2022. Accessed: 2024-10-16. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en>>.
- OBILE, W. Ericsson mobility report. **Nov**, 2016.
- RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! **IEEE Access**, IEEE, v. 1, p. 335–349, 2013.
- REC, I. itu-r p. 838-3. specific attenuation model for rain for use in prediction methods. **International Telecommunication Union-ITU**, fevereiro, p. 838–3, 2005.
- SERIES, M. Systems characteristics of automotive radars operating in the frequency band 76–81 GHz for intelligent transport. systems applications. **Recommendation ITU-R, M**, p. 2057–1, 2014.
- SINGH, S. et al. Interference analysis for highly directional 60-ghz mesh networks: The case for rethinking medium access control. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 916–930, 2015.
- Spectrum Matters. **Millimeter Wave is Necessary if the Growing Demand for Data is to be Met**. 2019. Accessed: 2024-10-16. Disponível em: <<https://spectrummattersindeed.blogspot.com/2019/05/millimeter-wave-is-necessary-if-growing.html>>.
- WANG, X. et al. Millimeter wave communication: A comprehensive survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 20, n. 3, p. 1616–1653, 2018.
- WELLS, J. Faster than fiber: The future of multi-g/s wireless. **IEEE microwave magazine**, IEEE, v. 10, n. 3, p. 104–112, 2009.