

Dissertação de Mestrado

Metodologia de Projetos para Enlaces Ópticos no Espaço Livre

Vanessa Galdino Mendes de Farias

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Metodologia de Projetos para Enlaces Ópticos no Espaço Livre

Vanessa Galdino Mendes de Farias

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Rossana Moreno Santa Cruz, D.Sc.
Orientadora

João Pessoa, Paraíba, Brasil
28 de Julho de 2014

©Vanessa Galdino Mendes de Farias

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

F224m

Farias, Vanessa Galdino Mendes de.

Metodologia de projetos para enlaces ópticos no espaço livre / Vanessa Galdino Mendes de Farias. – 2014.

110 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

Orientadora: Prof.^a Sc.D. Rossana Moreno Santa Cruz.

1. Engenharia elétrica. 2. Enlaces ópticos no espaço livre.
3. Efeitos atmosféricos. 4. Atenuação. 5. Dispersão. I. Título.

CDU 621.391

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Metodologia de Projetos para Enlaces Ópticos no Espaço Livre

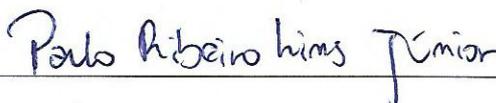
Vanessa Galdino Mendes de Farias

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 28 / 07 / 2014 .

Banca examinadora:



Professora Rossana Moreno Santa Cruz, D.Sc.
Orientadora (IFPB)



Prof. Paulo Ribeiro Lins Júnior, D.Sc.
Membro da Banca (IFPB-CG)



Prof. Marcelo Sampaio de Alencar ,Ph.D.
Membro da Banca (UFCG)

João Pessoa, Paraíba, Brasil
28 de Julho de 2014

© Vanessa Galdino Mendes de Farias

A Deus, meu Pai Celeste, por todo amor, força e sabedoria e aos meus amados pais, essenciais em minha vida, sem os quais não teria conseguido realizar este sonho. "... Porque tudo vem de Ti, e das tuas mãos te damos."

Agradecimentos

- ★ Em primeiro lugar, agradeço ao meu Deus e Pai, o único Digno de receber a honra, a glória e o louvor, porque tudo é Dele e por Ele tudo o que foi feito se fez;
- ★ Aos meus pais, Isaias e Verônica, amores da minha vida e a minha base, por todos os esforços realizados e por estarem sempre ao meu lado apoiando minhas decisões com paciência e amor. Sem eles, não teria chegado até aqui;
- ★ À minha querida irmã e melhor amiga, Walquiria, por toda compreensão e força em todos os momentos;
- ★ À minha amada avó Vastir, família preciosa e amigas pessoais (Lorena, Izabela e Klênia), pelo constante apoio e incentivo;
- ★ À professora Rossana Moreno Santa Cruz, minha Orientadora, por toda paciência, dedicação, incentivo e preciosas contribuições prestadas no desenvolvimento desta pesquisa;
- ★ Ao professor Paulo Ribeiro Lins Júnior, por sua disponibilidade em partilhar seus conhecimentos e orientações acadêmicas, que foram importantes no desenvolvimento desta pesquisa;
- ★ A todos os colegas da turma de mestrado, em especial, Sérgio, André, Luiz e Laio pela parceria nos estudos, conhecimentos compartilhados e amizade durante esses dois anos;
- ★ Ao ICEA, na pessoa do Sgt. Neto, pela disponibilidade do banco de dados e importante auxílio em dúvidas que surgiram sobre questões meteorológicas;
- ★ Ao INPE, ao INMET e a Infraero, pela disponibilidade de dados;
- ★ A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e dos Cursos de Telecomunicações e Engenharia Elétrica do IFPB que de forma direta ou indireta, foram fundamentais ao desenvolvimento do meu aprendizado e realização deste sonho;
- ★ Ao IFPB, pela preciosa oportunidade de pesquisa.

“Toda a vida deles neste mundo e todas as suas aventuras...haviam sido apenas a capa e a primeira página do livro.”
(A Última Batalha - C.S. Lewis)

Resumo

Os enlaces ópticos no espaço livre têm se tornado uma tecnologia promissora para redes de banda larga sem fio e uma alternativa de acesso à última milha, para serem utilizados em substituição ou em conjunto com os tradicionais sistemas de radiofrequência e fibras ópticas. No entanto, o desempenho das comunicações ópticas no espaço livre é dependente das condições do meio de transmissão do feixe de luz, a atmosfera. Fatores climáticos como chuvas e nevoeiros por meio de absorção e espalhamento, ocasionados por gotas de águas e partículas de aerossol suspensas no ar, além das turbulências, atenuações geométricas e outros efeitos podem prejudicar o enlace óptico. Estatísticas anuais de visibilidade e taxas de precipitações podem auxiliar o projetista na caracterização do meio em que será instalado o sistema. Esta análise pode ser realizada por meio da verificação dos valores de visibilidade mínima e precipitação máxima diárias. Esta dissertação busca apresentar uma metodologia de projeto que leve em consideração um número de efeitos atmosféricos ocorrendo simultaneamente, utilizando dados reais de aeroportos localizados em algumas cidades brasileiras, tais como, João Pessoa – PB, Recife – PE, Porto Alegre – RS, Brasília – DF, Manaus – AM e São Paulo – SP, durante o período 2010-2012. Com estes dados reais, são realizados balanços de potência que levam em consideração o maior número de efeitos simultâneos, assim como é calculada a previsão de disponibilidade por meio de funções cumulativas de probabilidade, para cada localidade. Além disso, considerando que as fontes luminosas dos enlaces ópticos no espaço livre apresentam largura espectral não nula, estando sujeitas, portanto, aos efeitos de dispersão, são apresentadas expressões para o cálculo da dispersão e do alargamento de pulso na atmosfera, em função do comprimento de onda, e baseada na teoria da dispersão material das fibras ópticas. Com isto, pretende-se contribuir com a elaboração de uma metodologia de projeto que possa ser empregada em enlaces ópticos no espaço livre.

Palavras-Chave: Enlaces Ópticos no Espaço Livre, Efeitos Atmosféricos, Atenuação, Dispersão.

Abstract

Free space-optics links are a promising technology for broadband wireless networks and a last mile alternative to replace or be used together with radiofrequency broadband wireless networks and alternative to replace or be used together with radiofrequency and optical fibers. However, the performance of optical communications in free space depends on the influence atmospheric effects on light beam transmission. Climatic factors such as rain and fog through absorption and scattering, caused by water droplets and aerosol particles suspended in air, in addition to turbulence, geometrical losses and other effects can severely hinder the optical link. Annual statistics of visibility and precipitation rates can help the designer to characterize the environment in which the system will be installed. This analysis can be performed by checking the values of minimum visibility and maximum daily precipitation, that reflect the worst case in the locality analyzed. This dissertation aims to present a design methodology that consider a number of effects occurring simultaneously, based on actual data from from some airports localized in Brazilian cities, such as João Pessoa - PB, Recife - PE, Porto Alegre - RS, Brasília - DF, Manaus - AM and São Paulo - SP, during the period 2010-2012. Based on real data, power balances are computed, considering a number of effects occurring simultaneously, as well as the availability prediction is calculated using the cumulative probability for each location. Moreover, considering that light sources of the free space optical links have a non zero spectral width, therefore, subjected to dispersion effects, expressions to calculate atmosphere dispersion and pulse broadening are presented, as a function of wavelength and based on the material dispersion theory of optical fiber systems. In this way, this dissertation intends to contribute with the elaboration of a complete design methodology that can be applied to free space optical links.

Key-Words: Free Space-Optics Communication, Atmospheric Effects, Attenuation, Dispersion.

Lista de Siglas

Anatel – Agência Nacional de Telecomunicações
ANSI – *American National Standards Institute*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
APD – *Avalanche Photodiode*
DFB – *Distributed Feedback*
FP – *Fabry-Perot*
FSO – *Free Space Optics*
FTTB – *Fiber-to-the-Building*
FTTC – *Fiber-to-the-Curb*
FTTCab – *Fiber-to-the-Cabinet*
FTTH – *Fiber-to-the-Home*
ICEA – Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IEC – *International Electrotechnical Commission*
INPE – Instituto nacional de Pesquisas Espaciais
IME – Instituto Militar de Engenharia
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
ISA – *Internacional Standard Atmosphere*
ITU – *International Telecommunication Union*
LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
NBR – Norma Brasileira
RF – Radiofrequência
SIGANATEL – Sistema de Informações Geográficas da Anatel
VCSEL – *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*
WIMAX – *Worldwide Interoperability for Microwave Access*
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Λ – Período requerido para a ação da grade em um comprimento de onda

α_n – Absorção por aerossóis

α_m – Absorção molecular

β_m – Atenuação por espalhamento Rayleigh

β_n – Atenuação por espalhamento Mie

σ – Atenuação total

O_2 – Oxigênio

H_2O – Água

O_3 – Ozônio

CO_2 – Gás carbônico

λ_0 – Comprimento de onda relacionado à frequência angular

ϵ_0 – Constante dielétrica

c – Velocidade da luz

V – Visibilidade

γ_A – Atenuação para nevoeiro por advecção

γ_R – Atenuação para nevoeiro por radiação

A_g – Atenuação geométrica

S_R – Área da superfície da lente do receptor

S_T – Área da superfície da lente do transmissor

A_c – Atenuação por chuvas

R_p – Nível de precipitação

ν – Viscosidade cinemática

R_e – Número de Reynolds

L_0 – Escala de turbulência externa

l_0 – Escala de turbulência interna

$n(R)$ – Índice de refração da atmosfera

$P(R)$ – Pressão atmosférica

$T(R)$ – Temperatura atmosférica

C_v^2 – Parâmetro de estrutura de velocidade

C_n^2 – Parâmetro de flutuação do índice de refração

C_T^2 – Parâmetro de estrutura da temperatura

- σ_i^2 – Variância de Rytov
 σ_r – Variância radial do deslocamento do feixe
 P_{Rx} – Potência de recepção
 P_{Tx} – Potência de transmissão
 L_{Atm} – Perdas por atenuação atmosférica
 L_{Ch} – Perdas por chuvas
 L_{Cint} – Perdas por cintilação
 L_{Geom} – Perdas por atenuação geométrica
 L_{Dsl} – Perdas por deslocamento aleatório do feixe
 ω – Frequência angular
 β – Variação da fase em relação à posição
 v_f – Velocidade de fase
 v_g – Velocidade de grupo
 n_f – Índice de refração de fase
 n_g – Índice de refração de grupo
 $n^2(w)$ – Índice de refração da sílica
 λ_i – Comprimento de onda da frequência de ressonância da ordem i
 A_i – Valor do coeficiente da fórmula de Sellmeier da ordem i
 $\Delta\lambda$ – Largura espectral da fonte luminosa
 $\Delta(\tau)$ – Alargamento de pulso
 D_M – Dispersão material das fibras ópticas
 D_{MS} – Dispersão material da sílica pura
 D_A – Dispersão atmosférica
 D_{AIR} – Dispersão atmosférica para o índice de refração constante
 $\left(\frac{\Delta\tau}{L}\right)$ – Alargamento de pulso por unidade de comprimento
 T_0 – Temperatura padrão ao nível do mar
 Z – Altitude do ponto
 T_M – Temperatura medida por termômetros a 1,5 m de altura
 T_R – Temperatura resultante em função da altitude acima de 1,5 m do solo
 V_T – Variação da temperatura a cada 1 m acima do solo
 D_{AL} – Diferença de altura em um ponto a 1,5 m do solo e a altura da estação hipotética
 p_M – Pressão medida por sensores
 p_0 – Pressão atmosférica padrão ao nível do mar
 p_h – Pressão atmosférica em uma atmosfera padrão na altitude da estação hipotética
 T_h – Temperatura em uma atmosfera padrão na altitude da estação hipotética

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos e Motivação	4
1.2	Organização da Dissertação	5
2	Fundamentos das Comunicações Ópticas no Espaço Livre	7
2.1	Dispositivos de Transmissão e Recepção	9
2.1.1	Principais Fontes Transmissoras	9
2.1.2	Principais Fotodetectores	11
2.2	Segurança no Uso de Transceptores FSO	12
2.3	Modelos de Canal para Enlaces Ópticos no Espaço Livre	13
2.3.1	Atenuação Atmosférica	13
2.3.2	Atenuação Geométrica	19
2.3.3	Atenuação por Chuvas	20
2.3.4	Turbulência	22
2.3.5	Principais Efeitos Ocasionados pela Turbulência em Enlaces Ópticos	27
2.4	Algumas Técnicas para Redução dos Principais Efeitos sobre o Enlace Óptico no Espaço Livre	29
3	Balanco de Potência para Enlaces Ópticos no Espaço Livre	31
3.1	Balanco de Potência	32
3.1.1	Cenários Brasileiros	33
3.2	Resultados e Simulações para as Cidade de Recife – PE, João Pessoa – PB, Porto Alegre – RS, Brasília – DF, Manaus – AM e São Paulo – SP em 2012	43
3.3	Balanco de Potência para Enlaces FSO nas Cidades de Recife – PE, João Pessoa – PB, Porto Alegre – RS, Brasília – DF, Manaus – AM e São Paulo – SP	59
3.4	Previsão de Disponibilidade	66
4	Dispersão em Enlaces Ópticos no Espaço Livre	70
4.1	Conceitos de Dispersão e Distorção do Sinal	70
4.2	Dispersão Atmosférica do Canal Óptico	77
4.2.1	Alargamento de Pulso na Atmosfera	81

SUMÁRIO	x
4.2.2 Cálculo da Dispersão e Alargamento de Pulso na Atmosfera	81
5 Conclusões	92
Referências Bibliográficas	98
ANEXOS	98
A Funções Cumulativas de Probabilidade de Visibilidade e Precipitação Diárias em 2012	100
B Funções Cumulativas de Probabilidade de Visibilidade (Dados Horários em 2012) - Regiões de Interesse	107

Lista de Figuras

1.1 Fluxograma da Metodologia de Projeto.	4
2.1 Representação simplificada de um enlace FSO.	7
2.2 Transceptor FSO	8
2.3 Transmitância da atmosfera, devido à absorção molecular	14
2.4 Representação de colisões entre o feixe de luz e partículas dispersas no ar	16
2.5 Atenuação em função da visibilidade por espalhamento Mie, para comprimentos de onda de 785 nm e 1550 nm.	17
2.6 Atenuação em função da visibilidade mínima predominante no Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, registradas nos meses de abril a julho de 2013, para nevoeiros densos por advecção e radiação, no comprimento de onda de 1550 nm	19
2.7 Atenuação geométrica em função da distância do enlace.	20
2.8 Atenuação em função da precipitação	21
2.9 (a) Fluxo de ar turbulento. (b) Fluxo de ar laminar.	23
2.10 Transferência de energia pelas células turbulentas	23
2.11 Variação do índice de refração do ar em relação a um, ao longo do dia 04/01/2010, em estação meteorológica do INPE (Recife/PE).	25
2.12 Parâmetro de flutuação do índice de refração, medido na cidade da Flórida, a 1,5 m do solo para uma distância de enlace de 150 m	26
2.13 Atenuação devido à cintilação em 785 nm, 850 nm e 1550 nm e C_n^2 de $10^{-14}m^{-2/3}$	27
2.14 Deslocamento aleatório do feixe provocado por células turbulentas	28
2.15 Atenuação devido ao deslocamento aleatório do feixe em 785 nm, 850 nm e 1550 nm.	29
3.1 Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto do Guararapes.	34
3.2 Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto do Guararapes.	35
3.3 Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Castro Pinto.	36
3.4 Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Castro Pinto.	36
3.5 Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Salgado Filho.	37

3.6	Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Salgado Filho.	38
3.7	Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek.	39
3.8	Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek.	39
3.9	Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Eduardo Gomes.	40
3.10	Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Eduardo Gomes.	41
3.11	Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto de Guarulhos - SP.	42
3.12	Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto de Guarulhos - SP.	42
3.13	Atenuação atmosférica em função da visibilidade, no Aeroporto dos Guararapes em 2012.	44
3.14	Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Castro Pinto.	45
3.15	Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Salgado Filho.	46
3.16	Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek.	47
3.17	Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Eduardo Gomes.	48
3.18	Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Internacional de Guarulhos.	49
3.19	Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas em 2012, no Aeroporto dos Guararapes.	50
3.20	Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas em 2012, no Aeroporto Castro Pinto.	51
3.21	Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Salgado Filho em 2012.	52
3.22	Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Juscelino Kubitschek em 2012.	53
3.23	Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Eduardo Gomes, em 2012.	54
3.24	Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Internacional de Guarulhos, em 2012.	55
3.25	Atenuação geométrica para diferentes ângulos de divergência.	56
3.26	Atenuação geométrica para lentes de diferentes dimensões.	57
3.27	Atenuação ocasionada por cintilação, em turbulências forte e média, em diferentes comprimentos de onda.	58
3.28	Atenuação ocasionada por deslocamento aleatório do feixe, em turbulências forte e média, em diferentes comprimentos de onda.	59
3.29	Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Guararapes.	61
3.30	Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Castro Pinto.	62
3.31	Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Juscelino Kubitschek.	63
3.32	Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Eduardo Gomes.	64
3.33	Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto de Guarulhos.	65
3.34	Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Salgado Filho.	66

4.1	Efeito do comprimento de onda sobre o valor do índice de refração da sílica pura.	73
4.2	Dispersão material para a Sílica pura	76
4.3	Variação do índice de refração do ar em João Pessoa - PB (Estação INMET).	78
4.4	Variação do índice de refração do ar ao longo do dia em João Pessoa - PB (Estação INMET).	79
4.5	Imagem de localização das estações meteorológicas do INPE e INMET obtidas pelo <i>Google Earth</i>	82
4.6	Perfil do terreno e linha de visada das estações meteorológicas do INPE e INMET, em Campo Grande – MS.	83
4.7	Dispersão atmosférica para diferentes comprimentos de onda.	86
4.8	Dispersão atmosférica para diferentes comprimentos de onda utilizando valores de pressão e temperatura padrão.	87
4.9	Variação do alargamento de pulso para diferentes comprimentos de onda e valores de largura espectral, tomando como referência pressão e temperatura mensurados nas estações.	90
4.10	Variação do alargamento de pulso para diferentes comprimentos de onda e valores de largura espectral, tomando como referência pressão e temperatura padrão.	91
A.1	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, em João Pessoa – PB.	100
A.2	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional dos Guararapes, em Recife – PE.	101
A.3	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre – PA.	101
A.4	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília – DF.	102
A.5	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, em Manaus – AM.	102
A.6	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo – SP.	103
A.7	Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, em João Pessoa – PB.	103
A.8	Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional dos Guararapes, em Recife – PE.	104
A.9	Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre – PA.	104
A.10	Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília – DF.	105
A.11	Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, em Manaus – AM.	105
A.12	Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo – SP.	106

B.1	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, em João Pessoa – PB.	107
B.2	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional dos Guararapes, em Recife – PE.	108
B.3	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre – PA.	108
B.4	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília – DF.	109
B.5	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, em Manaus – AM.	109
B.6	Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo – SP.	110

Lista de Tabelas

3.1	Visibilidades mínimas em Recife - PE.	43
3.2	Visibilidades mínimas em João Pessoa – PB.	44
3.3	Visibilidades mínimas em Porto Alegre – RS.	45
3.4	Visibilidades mínimas em Brasília – DF.	46
3.5	Visibilidades mínimas em Manaus – AM.	47
3.6	Visibilidades mínimas em São Paulo – SP.	48
3.7	Precipitações máximas em Recife – PE.	50
3.8	Precipitações máximas em João Pessoa – PB.	50
3.9	Precipitações máximas em Porto Alegre – RS.	51
3.10	Precipitações máximas em Brasília – DF.	52
3.11	Precipitações máximas em Manaus – AM.	53
3.12	Precipitações máximas em São Paulo – SP.	54
3.13	Dados para o balanço de potência realizado em Recife – PE.	60
3.14	Dados para o balanço de potência realizado em João Pessoa – PB.	61
3.15	Dados para o balanço de potência realizado em Brasília – DF.	62
3.16	Dados para o balanço de potência realizado em Manaus – AM.	63
3.17	Dados para o balanço de potência realizado em São Paulo – SP.	64
3.18	Dados para o balanço de potência realizado em Porto Alegre – RS.	65
3.19	Frequência de visibilidade em cidades do Brasil.	67
3.20	Disponibilidade para enlace em João Pessoa – PB em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).	68
3.21	Disponibilidade para enlace em Recife – PE em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).	68
3.22	Disponibilidade para enlace em Porto Alegre – PA em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).	68
3.23	Disponibilidade para enlace em Brasília – DF em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).	68
3.24	Disponibilidade para enlace em Manaus – AM em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).	69
3.25	Disponibilidade para enlace em São Paulo – SP em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).	69

4.1	Valores dos coeficientes da fórmula de Sellmeier para a sílica pura	72
4.2	Valores de pressão e temperatura, nas estações do INPE e INMET, às 12 horas, do dia 01/01/2010.	83
4.3	Valores de temperatura, nas estações do INPE e INMET.	84
4.4	Valores de temperatura, nas estações do INPE e INMET na altura das estações hipotéticas. .	85
4.5	Valores de temperatura e pressão baseados em valores padrões.	85
4.6	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (850 nm - $\Delta\lambda = 0,85$ nm)	88
4.7	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (1550 nm - $\Delta\lambda = 0,5$ nm)	88
4.8	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (780 nm - $\Delta\lambda = 0,85$ nm)	88
4.9	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (840 nm - $\Delta\lambda = 0,65$ nm)	88
4.10	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa DFB (1550 nm - $\Delta\lambda = 1$ nm) .	89
4.11	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa FP (1550 nm - $\Delta\lambda = 1,3$ nm) .	89
4.12	Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa FP (852 nm - $\Delta\lambda = 3$ nm) . . .	89

Lista de Quadros

2.1 Código Internacional de Visibilidade	22
--	----

Os sistemas de comunicação óptica no espaço livre (*Free Space Optics – FSO*) são constituídos de unidades ópticas sem fio transmissoras e receptoras, que utilizam feixes ópticos para transportar dados por meio da atmosfera ou vácuo [1]. Originalmente desenvolvidos pela NASA e militares, têm sido utilizados há pouco mais de três décadas em comunicações de alta velocidade [2], [3].

Na década de 1960, com o surgimento do Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), estudos desenvolvidos pela NASA buscavam a utilização de Lasers para a comunicação inter-satélite. Há registros de que os primeiros experimentos foram voltados à tentativa de estabelecer comunicação dentro de uma cápsula espacial [4], [5]. Os sistemas de comunicações ópticas no espaço livre continuaram a ser desenvolvidos, em especial, voltados à aplicação militar, tendo em vista a dificuldade na interceptação dos dados, além da rápida instalação, e também nas comunicações entre satélites.

Estudos têm sido realizados e tecnologias têm sido desenvolvidas com o intuito de aumentar a capacidade de transmissão de informações, tendo em vista a demanda crescente do mercado por transmissão e rapidez elevada de dados em curtas distâncias [6]. Em 2001, após o atentado ao *World Trade Center*, a estrutura responsável pela comunicação local foi afetada. Como alternativa rápida e eficiente, foram instalados sistemas FSO, que permitiram o restabelecimento da comunicação entre empresas e suas filiais, distantes alguns quilômetros até que, semanas depois, o cabeamento óptico fosse concluído [5], [7].

Entre as principais aplicações de enlaces FSO destacam-se [4], [6] :

- ▣ Expansão de redes metropolitanas e intranet;
- ▣ Acesso de última milha;
- ▣ Atendimento a áreas de elevada densidade demográfica, onde poderia haver problemas na instalação de fibras ópticas, assim como saturação do espectro de micro-ondas, podendo compartilhar inclusive a mesma estrutura de sistemas de telefonia celular, sem que o feixe de luz seja influenciado por interferência de radiofrequências.

Os enlaces FSO possuem vantagens, dentre as quais se destacam, elevada capacidade de transmissão, podendo atingir 10 *Gbits/s*, em curtas distâncias [2], [3]; imunidade a

interferências eletromagnéticas geradas por sistemas de radiofrequência (cujo espectro já está bastante saturado); isenção de obtenção de licenças para funcionamento, assim como autorizações junto às prefeituras, em oposição aos sistemas que usam fibras ópticas, que acarretam custos de instalações e necessitam de liberações para a utilização de postes e passagem de cabos nas ruas e facilidade na instalação de transceptores.

É importante destacar que a atmosfera é um meio de transmissão sujeito a condições adversas, que podem provocar perturbações e oscilações na transmissão do feixe de luz. Fatores climáticos como chuvas e nevoeiros podem prejudicar bastante o enlace óptico por meio de absorção, espalhamento, dentre outros, ocasionados por gotas de águas e partículas de aerossol suspensas no ar, assim como atenuações geométricas [8]. Devido a estas características do meio de transmissão, o alcance de sistemas FSO na atmosfera, sujeito aos efeitos de atenuação característicos do meio, pode variar de centenas de metros a pouco mais que 10 km [3].

A atenuação atmosférica dos sistemas FSO com a distância do enlace pode degradar a confiabilidade desses sistemas, limitando-os a curtas distâncias [2]. Logo, faz-se necessário analisar todos os efeitos atmosféricos que poderão prejudicar o bom desempenho do enlace.

Entre as atuais tecnologias utilizadas na comunicação sem-fio, destaca-se a WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), com configurações semelhantes a Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), no entanto, com capacidade de cobertura muito maior, podendo alcançar até 50 km de raio [6] e atingir taxas de transmissão da ordem de 75 *Mbits/s* [9]. Produtos como o Proxim Tsunami MP-8100 podem atingir velocidades iguais a 300 *Mbits/s*, em enlaces de até 8 km [2]. Porém, apesar da possibilidade de atingir altas taxas de dados, ainda não alcança taxas na ordem de *Gbits/s*, como os sistemas FSO. Ademais, a faixa de operação da tecnologia WiMAX localiza-se entre 2,5 e 11 GHz. Para 3,5 e 10,5 GHz, há a necessidade de obtenção de autorização para uso por meio de leilões realizados pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), que seria uma alternativa para quem deseja obter uma transmissão com menor interrupção, tendo em vista a interferência elevada que as faixas de 2,5 e 5,8 GHz (não licenciadas) apresentam [6]. A imunidade à interferência eletromagnética por radiofrequência de enlaces FSO é uma das vantagens apresentadas, conforme já mencionado. Comparativamente, sistemas ópticos no espaço livre satisfazem o uso de taxas de transmissão elevadas em distâncias curtas.

Outra tecnologia que apresenta elevadas taxas de transmissão e é voltada ao acesso à última milha dos usuários é a FTTH (*Fiber-to-the-Home*), que corresponde à arquitetura em que a fibra conduz a informação até a residência do cliente. As taxas de transmissão oferecidas podem estar entre 20 e 100 *Mbits/s* por assinante, podendo atingir taxas bem maiores [6]. Dependendo da proximidade entre a fibra e o usuário, há outras classificações, tais como: FTTB (*Fiber-to-the-Building*), em que a fibra chega até o edifício e, a partir daí, há a distribuição para os apartamentos, por cabos coaxiais; FTTC (*Fiber-to-the-Curb*), que são caracterizadas por se distanciarem de, no máximo, 100 m do cliente [10], chegando até um armário central, e a partir do qual um cabo coaxial conduz o sinal à residência do usuário; e FTTCab (*Fiber-to-the-Cabinet*),

que corresponde à transmissão da informação por fibra, até um armário ou gabinete, localizado até 1 km do cliente [10]. Estas classificações possuem taxas de transmissão inferiores às apresentadas pela FTTH. Neste caso, o sistema FSO poderia ser uma alternativa complementar às fibras em locais cujas conexões por cabos de fibras ópticas sejam de difícil instalação. Assim, poderia ser evitado um maior grau de esforço e custos gerados na introdução de fibras, pois elas exigem escavações ou utilização de postes, o que pode ocasionar mudanças no trânsito das cidades, além da exigência de maior esforço para a condução dos cabos nos postes de energia já existentes, ou na introdução de novos, direcionados apenas para este fim [2].

Outra tecnologia é baseada na utilização de FSO em conjunto com radiofrequência (RF) na faixa de 60 GHz e 80 GHz, conhecida como sistema híbrido. Os sistemas híbridos podem garantir uma disponibilidade maior que o sistema FSO, considerando as condições do meio atmosférico. Logo, quando há uma indisponibilidade do sistema FSO, o enlace de RF pode ser uma alternativa. Há pesquisas que afirmam que esta seria uma solução para enlaces de curta distância, pois permite a união da elevada capacidade dos enlaces ópticos no espaço livre, com a confiabilidade dos sistemas RF. No entanto, quando se opta por frequências mais altas em enlaces de RF, apesar da maior capacidade que se possa atingir, o sistema passa a ser afetado mais intensamente pelas condições de perturbações atmosféricas fortes, além de apresentar erros, assim como os sistemas FSO.

Os enlaces ópticos no espaço livre têm avançado como uma tecnologia promissora para a próxima geração de redes de banda larga sem fio [2] e têm se tornado uma excelente alternativa para serem utilizados em substituição, (ou pelo menos em conjunto) em algumas aplicações, aos tradicionais sistemas de radiofrequência e fibras ópticas [1], [2]. No entanto, é importante que o projetista conheça os efeitos que poderão influenciar o adequado funcionamento do sistema FSO. Para que isto ocorra de forma eficiente, devem ser levadas em consideração as características específicas do meio de transmissão, especialmente as condições climáticas a que está submetido, de modo a obter um modelo de canal que estime a influência dos efeitos atmosféricos no enlace, ocorrendo de forma simultânea. Na literatura, poucos trabalhos consideram a ação conjunta desses efeitos. Também devem ser analisadas as características das fontes luminosas e fotodetectores mais adequados a este tipo de sistema.

Desta forma, com base nas características específicas deste sistema, faz-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para implementação de um enlace óptico no espaço livre, que considere, sempre que possível, a ação conjunta de vários efeitos e seja adequado a aplicações em telecomunicações. Para o Brasil, particularmente, essa metodologia de projetos torna-se bastante importante, uma vez que as regiões do País apresentam diferentes condições atmosféricas e climáticas, fazendo com que alguns efeitos tenham maior influência do que outros, dependendo da região considerada. Esta metodologia seguirá as etapas do fluxograma apresentado na Figura 1.1.

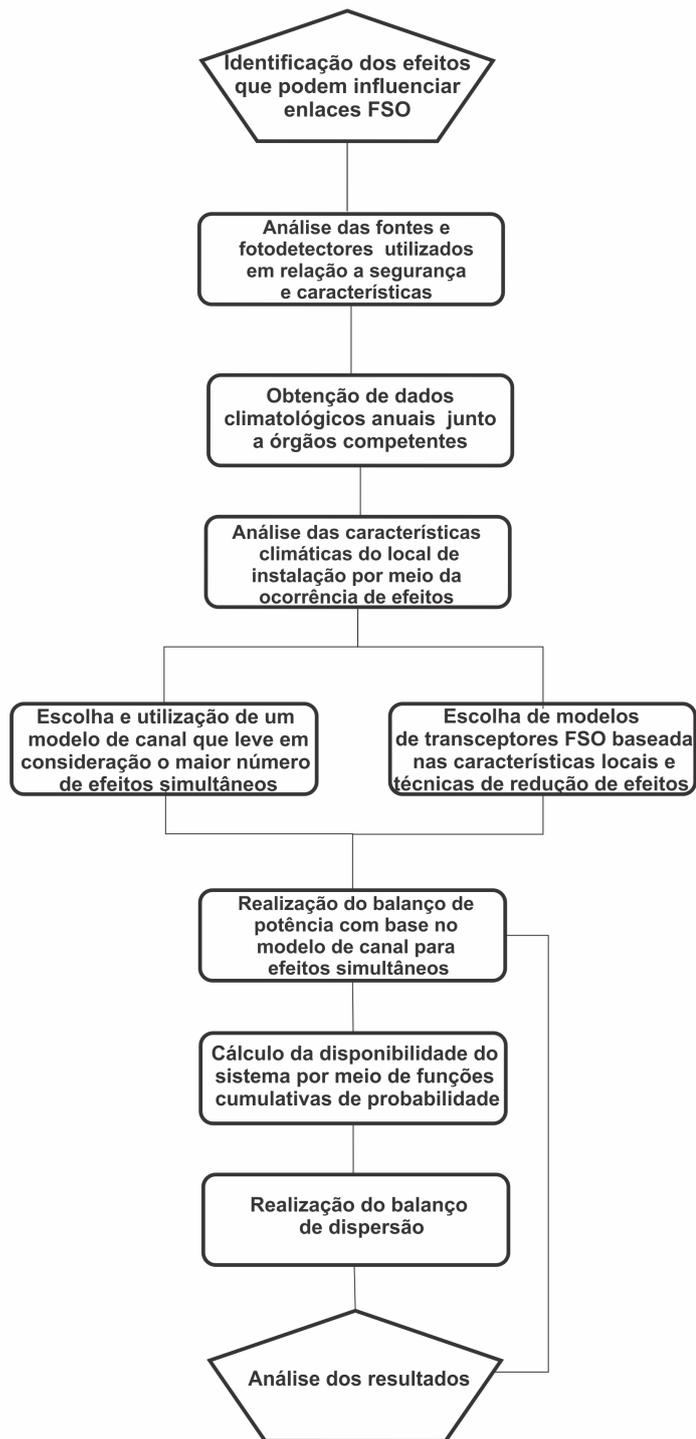


Figura 1.1 – Fluxograma da Metodologia de Projeto.

1.1 – Objetivos e Motivação

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de projeto voltada à utilização da comunicação óptica no espaço livre, com base em um modelo de canal que represente o maior número de efeitos simultâneos, considerando as diferentes características das regiões do País, de modo a servir como referência a um projetista na instalação de sistemas ópticos no espaço

livre nesses locais. Vale ressaltar que estes efeitos são em geral analisados separadamente na literatura e, quando vistos em conjunto, utilizam informações de apenas uma ou duas localidades, situadas nas regiões Sudeste ou Norte do País, o que torna os modelos menos realísticos. Por isso, foi realizada uma análise teórica sobre os fundamentos dos enlaces ópticos no espaço livre, apresentando as principais fontes luminosas e fotodetectores utilizados e as normas de segurança para a utilização desses componentes, além dos principais modelos de canais que fornecem o embasamento teórico para a análise dos efeitos conjuntos.

Assim foram analisadas as diferentes condições atmosféricas de cidades representativas das cinco regiões brasileiras: João Pessoa – PB, Recife – PE, Porto Alegre – RS, Brasília – DF, Manaus – AM e São Paulo – SP, com base em dados estatísticos anuais de visibilidades mínimas e taxas de precipitação máxima registradas diariamente, entre os anos de 2010 e 2012, em Aeroportos de todas essas cidades, ou seja, os piores casos diários, de modo a obter uma previsão das situações atmosféricas que podem ser encontradas nessas localidades e, deste modo validar o cálculo dos efeitos ocorrendo simultaneamente. Adicionalmente, apresenta-se a previsão de disponibilidade desses enlaces a uma taxa maior ou igual a 99%, por meio de funções cumulativas de probabilidade de visibilidade e precipitação. Além disso, considerando que as fontes luminosas para FSO são semelhantes às utilizadas em sistemas de fibras ópticas, com base na teoria da dispersão material das fibras ópticas é proposto um modelo de dispersão em função do comprimento de onda e por meio de folhas de dados de fontes luminosas, são apresentados valores de dispersão e alargamento de pulso, que poderão existir no canal atmosférico. Procura-se com isso, desenvolver uma metodologia de projeto estruturada para que os sistemas FSO possam ser projetados de forma organizada, em enlaces de curta distância.

Esta dissertação propõe apresentar uma metodologia de projeto para implementação de um enlace óptico no espaço livre, que considere, sempre que possível, a ação conjunta de vários efeitos atmosféricos nas diferentes regiões do País e que seja adequada a aplicações em telecomunicações.

1.2 – Organização da Dissertação

Além desta introdução, a dissertação é constituída por mais quatro capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos das comunicações ópticas no espaço livre, as fontes luminosas e fotodetectores utilizados, assim como normas de segurança às quais o projetista precisa estar atento na elaboração do projeto. Além disso são apresentados os principais modelos de canal atmosféricos.

No Capítulo 3 são analisadas as características atmosféricas em cidades representativas das cinco regiões brasileiras e, com base nessa análise, são apresentados balanços de potência e a previsão de disponibilidade para enlaces instalados nessas localidades.

No Capítulo 4 a partir da teoria da dispersão material das fibras ópticas apresenta-se um modelo para análise da dispersão atmosférica e, com base em folhas de dados de fontes

luminosas, são apresentados valores de dispersão e alargamento de pulso em enlaces ópticos no espaço livre.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para pesquisa futura na área.

Fundamentos das Comunicações Ópticas no Espaço Livre

A tecnologia para enlaces ópticos no espaço livre tem se destacado nos últimos anos como alternativa sem fio, voltada principalmente a distâncias de poucos quilômetros, em relação aos atuais enlaces baseados em radiofrequência e fibras ópticas, no que diz respeito, em especial, à imunidade a interferências de radiofrequências e rapidez e facilidade de instalação [1], [2]. Na Figura 2.1, é possível observar uma representação simplificada de um enlace FSO.



Figura 2.1 – Representação simplificada de um enlace FSO.

Os sistemas FSO são compostos por transceptores de sinais ópticos. O princípio de operação básico desses sistemas é baseado na conversão de sinais elétricos pela fonte transmissora, LASER ou LED (*Light Emitting Diodes*) em sinais ópticos, que são transmitidos pela atmosfera e detectados na recepção por um fotodiodo, que processa e recupera o sinal elétrico original. Há a necessidade da utilização de lentes e espelhos curvos, que permitam a eficiência na transmissão e recepção do sinal. Esses elementos ópticos localizados no receptor servem para direcionamento do feixe em um pequeno ângulo de abertura e possuem como função principal a convergência da radiação na área de detecção do fotodiodo [6]. A representação de um transceptor FSO é mostrada na Figura 2.2.

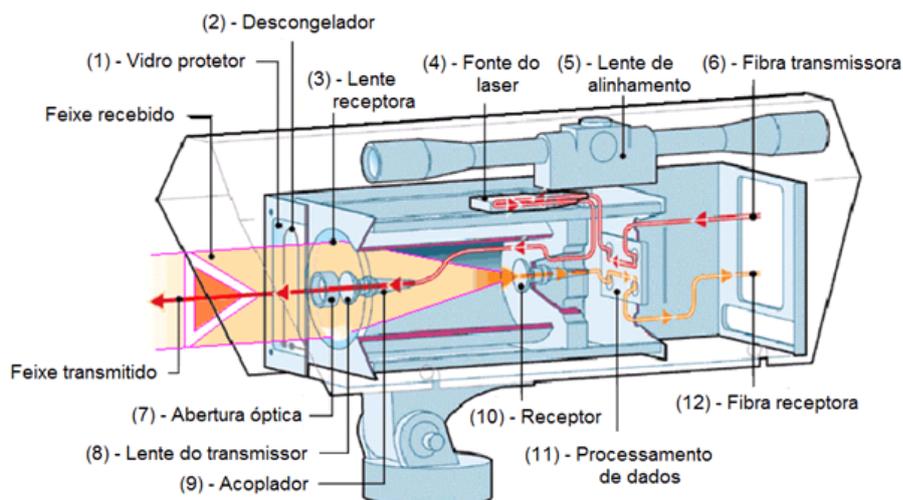


Figura 2.2 – Transceptor FSO [4].

É importante destacar que o alinhamento dos transceptores ópticos no espaço livre é delicado, tendo em vista os feixes de luz bastante estreitos e diretivos. Isto se caracteriza como vantagem no que diz respeito à maior colimação do feixe de luz em direção ao receptor, contribuindo com o aumento da densidade de potência recebida. No entanto, esta característica pode dificultar a manutenção do alinhamento entre a conexão ponto a ponto de um enlace FSO, devido à maior facilidade de desalinhamentos ocasionados por oscilações de edificações, ventos fortes atenuação atmosférica, entre outros. Logo, faz-se necessário analisar técnicas de alinhamento que possam auxiliar na obtenção de uma conexão mais eficiente.

As fontes utilizadas em enlaces ópticos no espaço livre são semelhantes às utilizadas em fibras ópticas, mas se faz necessária a análise das fontes que mais se adequam aos enlaces ópticos no espaço livre, tendo em vista as características do meio.

Conforme mencionado, o desempenho das comunicações ópticas no espaço livre é dependente das condições do meio de transmissão do feixe de luz, a atmosfera. Esse meio é sujeito a condições adversas, que podem provocar perturbações ao enlace. Fatores climáticos como chuvas e nevoeiros por meio de absorção e espalhamento, ocasionados por gotas de águas e partículas de aerossol suspensas no ar, além das turbulências, atenuações geométricas e outros efeitos, podem prejudicar bastante o enlace óptico [11], [12].

Perdas de intensidade do sinal podem alcançar valores de 300 dB/km [13], em situações de nevoeiro denso e, de forma semelhante, precipitações que variam entre 0,25 mm/h e 100 mm/h, apresentam perdas similares às obtidas em situações de céu limpo a nevoeiro leve [13].

Nesse capítulo, são analisadas algumas características fundamentais dos enlaces ópticos no espaço livre, importantes ao projeto desses sistemas, tais como as fontes de transmissão e fotodetectores utilizados, apresentando suas principais características e vantagens, além de modelos de canal para transmissão de sinal óptico no espaço livre, que fornecem o embasamento teórico para a elaboração de projetos de enlaces, levando em consideração as

condições do meio de transmissão. São apresentadas, ainda, as principais técnicas que auxiliam na redução desses efeitos.

2.1 – Dispositivos de Transmissão e Recepção

A escolha de uma fonte transmissora ideal às características do meio é um fator importante na elaboração de um projeto para enlaces ópticos no espaço livre. As fontes de luz mais utilizadas nas comunicações ópticas sem fio são os LEDs e os LASERs. O LED é geralmente utilizado em comunicações ópticas sem fio internas. No entanto, em aplicações para enlaces ópticos no espaço livre, em curtas distâncias e taxas de transmissão moderadas, o LED pode ser uma alternativa de baixo custo ao diodo LASER.

O LASER possui um feixe altamente diretivo e, em enlaces de longas distâncias, se torna fundamental para direcionar a energia transmitida ao receptor na forma de um feixe de luz bem colimado limitando dessa forma a perda de potência na transmissão do sinal. Para diminuir a divergência do feixe é ideal utilizar, além de uma fonte diretiva, telescópios com alta qualidade de direção do feixe, tanto no transmissor quanto no receptor, para aumentar a captação da potência da luz e reduzir a interferência da luz ambiente [14].

Os principais fotodetectores são o PIN e o APD (*Avalanche Photodiode*), e ambos podem ser utilizados em enlaces ópticos no espaço livre, dependendo das características do sistema.

2.1.1 – Principais Fontes Transmissoras

As principais características observadas na escolha de fontes de luz são: o comprimento de onda adequado à aplicação, abertura numérica, alta potência luminosa, diretividade, vida útil, largura espectral, confiabilidade e largura de banda de alta modulação. Ambos os dispositivos, LASER e LED, podem ser fabricados a partir dos mesmos materiais, em comprimentos de onda de interesse dos enlaces ópticos no espaço livre. Apesar do LED apresentar menor custo e maior vida útil que o LASER, esse último possui maior potência luminosa e diretividade, além de tempo de coerência e largura espectral significativamente menores que o LED. Essas características são importantes em enlaces ópticos no espaço livre que estão sujeitos a condições adversas de atenuação, difração e dispersão.

Entre as fontes de luz mais utilizadas em enlaces ópticos destacam-se os LASERs: *Fabry-Perot* (FP), *Distributed Feedback* (DFB) e o *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser* (VCSEL).

***Fabry-Perot* (FP)**

A estrutura do LASER *Fabry-Perot* é uma das mais simples e baseia-se em uma cavidade ressonante, constituída basicamente por dois espelhos planos paralelos entre si. Um

dos espelhos é projetado para refletir toda a luz incidente nele a partir da cavidade e outro para refletir menos, de modo a emitir a luz gerada na cavidade.

O FP transmite a maior parte de sua energia em um comprimento de onda central, mas também transmite em outros comprimentos de onda, chamados modos longitudinais. Esses modos são igualmente espaçados e distribuídos ao lado do comprimento de onda central. Quando o sinal é modulado, ele não permanece em um comprimento de onda fixo, mas assume diferentes valores durante o processo. Esse efeito não é interessante às comunicações ópticas e ocorre principalmente pela variação do índice de refração do dispositivo com a temperatura. Essa variação ocorre com a variação da corrente que é conduzida. Por isso, em geral, o LASER *Fabry-Perot* é utilizado em sistemas de comunicações ópticas de baixa velocidade [14].

Distributed Feedback (DFB)

O LASER DFB é otimizado para transmitir em um único comprimento de onda. Isso é realizado por meio da utilização de uma estrutura periódica chamada grelha de Bragg situada próximo à região ativa do LASER, de modo a filtrar todos os modos longitudinais, com exceção do modo central. Por meio de reflexões do feixe de luz não apenas em um ponto da região ativa, mas de forma distribuída nos declives da estrutura periódica, os fótons retornam para o meio ativo e, como resultado desse arranjo, apenas um comprimento de onda é irradiado [14]. Os feixes que satisfazem a condição de Bragg, apresentada em 2.1, são refletidos de volta para a região ativa [15].

$$\Lambda = m \left(\frac{\lambda_B}{2n} \right), \quad (2.1)$$

em que, Λ é o período requerido para a ação da grade em um comprimento de onda λ_B , n é o índice de refração efetivo do comprimento de onda e m é um número inteiro que representa a ordem da difração de Bragg. Logo, considerando que o DFB se propaga em apenas um modo longitudinal, a sua largura espectral é bastante estreita.

Vertical-Cavity Surface-Emitting (VCSEL)

Os diodos LASER discutidos são caracterizados por sua extensa região ativa e por seu padrão de radiação assimétrico. A configuração do VCSEL se baseia em uma cavidade ressonante vertical e perpendicular à região ativa. A emissão de luz é perpendicular a essa região e possui formato de um feixe circular. Acima e abaixo da região ativa, há camadas estreitas de espelhos nos quais os feixes de luz incidem a partir da superfície, por meio do substrato. Algumas características que destacam esse tipo de LASER em relação aos demais em aplicações nas comunicações ópticas guiadas e em espaço livre são [14]:

- ▣ Cavidade ressonante estreita, o que implica em uma largura espectral estreita;
- ▣ Elevada velocidade de comutação;

- ▣ Baixa corrente de limiar, o que reflete em maior eficiência e vida útil;
- ▣ Comprimento de onda muito estável, podendo operar de forma confiável em temperaturas de até 80 °C;
- ▣ Pequenas dimensões com típicas cavidade ressonantes com regiões ativas entre 1-5 μm ;
- ▣ Dispositivos comercialmente disponíveis em janelas de transmissão de enlaces ópticos no espaço livre.

Por esses e outros motivos o VCSEL é uma das fontes luminosas mais utilizadas em enlaces ópticos no espaço livre, conforme observado em folhas de dados das principais empresas fabricantes de transceptores ópticos no espaço livre, tais como *Lightpointe*, *Sonabeam* e *Terescope* [16], [17].

2.1.2 – Principais Fotodetectores

Na elaboração de um projeto de enlace óptico, a escolha de um fotodetector é tão importante quanto a de uma fonte transmissora. É necessário levar em consideração as características particulares dos diversos tipos, de modo a optar pelo que tenha melhor desempenho no enlace óptico sem fio. Os receptores, em geral, possuem como principal função a conversão do sinal óptico, recebido da fonte transmissora, em sinal elétrico, recuperando as informações transmitidas [15]. Na escolha de um fotodetector ideal, é importante analisar se este dispositivo apresenta alta sensibilidade aos comprimentos de onda que se deseja utilizar, largura de banda adequada, baixo ruído, custo acessível e baixa sensibilidade à temperatura, de modo a se encaixar na aplicação desejada.

O fotodiodo p-n é conhecido como o tipo mais básico, composto pelas camadas p e n. A luz geralmente incide na camada p, logo, a configuração utilizada pelos fabricantes em geral é que esta camada seja estreita, de modo que os fótons de baixo comprimento de onda e elevada energia possam passar pela camada antes de serem absorvidos, para um melhor aproveitamento da luz incidente. Já a região de exaustão (ou região ativa) deve ser mais larga e desta forma aumentar o número de portadores provenientes de fótons de grande comprimento de onda e, conseqüentemente, baixa energia [18].

Nos fotodiodos PIN, entre as camadas de cristais p e n, há uma camada de cristal semiconductor intrínseco. Esta camada adicional pode ser do tipo p ou do tipo n, com dopagem reduzida e localizada na região de exaustão. Nesta configuração, a região ativa é bem mais larga que as demais camadas. Isto permite que as lacunas percorram um caminho mais curto que os elétrons, o que reduz o seu tempo de transição, tendo em vista que as lacunas movimentam-se em uma velocidade inferior aos elétrons. Porém, é importante levar em consideração uma compensação moderada da camada intrínseca, pois, o seu aumento também pode limitar a resposta em frequência do dispositivo em questão [18].

O fotodiodo de avalanche (APD), possui um componente com ganho interno de corrente. Seu princípio de funcionamento é baseado na elevação da quantidade de portadores móveis na região de exaustão, após a colisão dos elétrons com a rede cristalina. O mecanismo de avalanche é baseado na aceleração das cargas dentro do semiconductor, que é submetido a elevadas tensões de polarização, que possibilitam a geração de pares elétron-lacuna. Os elétrons gerados adquirem energia cinética e colidem com outros átomos da rede cristalina, desprendendo mais pares elétron-lacuna e assim aumentando o nível de corrente gerado na saída do fotodetector. Nas aplicações em enlaces ópticos no espaço livre, costuma-se utilizar os fotodetectores PIN em enlaces de curta distância, tendo em vista o baixo custo. No entanto, em enlaces longos, costuma-se optar por fotodetectores APD [11].

2.2 – Segurança no Uso de Transceptores FSO

Algumas fontes luminosas podem ser perigosas em casos de contato direto com os olhos. Por isso, é necessário levar em consideração algumas medidas na escolha das fontes a serem utilizadas no projeto de um enlace óptico no espaço livre, de acordo com a aplicação, tendo em vista a capacidade do olho humano em focalizar a luz e concentrar a energia óptica. O comprimento de onda específico é importante, porque apenas alguns comprimentos de onda entre aproximadamente 0,4 e 1,4 μm , serão focalizados na retina. Em outros comprimentos de onda, a energia será absorvida pela córnea (parte frontal dos olhos) antes da energia ser focada e concentrada.

Há várias normas que regulamentam o uso dos comprimentos de onda nos países, as principais são [19]:

International Electrotechnical Commission (IEC): Publica normas internacionais relacionadas a equipamentos elétricos e LASERs. Essa norma não é obrigatória e fica a critério dos países a sua adoção.

American National Standards Institute (ANSI): É uma organização dos EUA e publica normas sobre o uso de LASERs (ANSI Z136.1). É adotada por várias agências reguladoras estaduais nos EUA.

No Brasil, não há normas que estabeleçam especificamente critérios que permitam identificar quais condições contribuem para a insegurança na operação do LASER nem qual seria o tipo de proteção adequada aos que operam ou se expõem à radiação, em aplicações terrestres [20].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui apenas duas normas relacionadas à tecnologia do LASER a NBR 14588 de 09/2000 e a NBR IEC 60601-2-22 de 10/1997, mas estas apresentam regras de segurança apenas para utilização de LASERs na medicina, não estabelecendo critérios para a utilização em outras áreas. Neste contexto recorre-se à normatização internacional [20].

Apesar das diferenças em relação a alguns critérios específicos, as organizações estabeleceram classificações em relação à potência, e ela é definida geralmente em classes de 1 a 4, na Classe 1 se encontram diodos LASER de menor potência e na Classe 4 os de maior potência. A norma comumente adotada pelas empresas é a IEC60825-1, que estabelece os parâmetros de conformidade de instalação com base em níveis de potência, define zonas de risco à segurança aos olhos e restringe determinados tipos de diodos LASER que possuem alta potência, em serem utilizados em locais acessíveis ao público [19]. De acordo com essa norma, os dispositivos que se encaixam nas Classes 1 e 1 M, são considerados seguros aos olhos, ou seja, não é o próprio comprimento de onda que determina a classificação. Mas, o resultado da utilização dos comprimentos de onda em determinados níveis de potência e abertura do dispositivo [8].

Classe 1– Dispositivos que operam na faixa de 302,5-4000 nm, não apresentam perigo em todas as condições de uso, inclusive à visão, na utilização de instrumentos ópticos, como microscópio.

Classe 1M– Dispositivos que operam na faixa de 302,5-4000 nm, não apresentam perigo em todas as condições de uso, com exceção à utilização de instrumentos ópticos, como microscópio.

Essas classificações são incluídas nas folhas de dados dos transceptores FSO, permitindo ao projetista conhecer o tipo de equipamento que está trabalhando.

2.3 – Modelos de Canal para Enlaces Ópticos no Espaço Livre

2.3.1 – Atenuação Atmosférica

Uma vez que a atmosfera é o meio de transmissão de informações dos sistemas ópticos no espaço livre, eles estão suscetíveis a condições adversas que devem ser consideradas no projeto, uma vez que podem ocasionar fenômenos ópticos, tais como: absorção, espalhamento e flutuações no índice de refração [11], [12]. A atenuação atmosférica à potência da fonte transmissora pode ser descrita pela lei de Lambert-Beer, dada por [13]

$$\tau(R) = \frac{P(R)}{P(0)} = e^{-\sigma \cdot R}, \quad (2.2)$$

na qual, $\tau(R)$ é a transmitância a uma distância R ; $P(R)$ é a potência da fonte transmissora a uma distância R ; $P(0)$ é a potência inicial da fonte transmissora e σ é o coeficiente total de atenuação.

O coeficiente de atenuação pode representar a contribuição de absorções e espalhamentos ocasionados por aerossóis e moléculas de gases suspensos no ar [13] e é dado por

$$\sigma = \alpha_{m0} + \alpha_a + \beta_r + \beta_m, \quad (2.3)$$

em que, α_{mo} , α_a , β_r e β_m correspondem, respectivamente, aos coeficientes por absorção molecular, absorção por aerossóis, espalhamento Rayleigh e espalhamento Mie.

Os espalhamentos se destacam no espectro da luz visível e as absorções no espectro do infravermelho.

Absorção

A atmosfera terrestre é um meio absorvente [12]. A absorção é ocasionada pela interação entre o feixe de luz e partículas dispersas no ar, como gotas de água, gases e poeira. A absorção atmosférica é dependente do comprimento de onda selecionado. Logo, há janelas de comprimentos de onda, em que ela pode ser evitada [21].

Há dois tipos de absorção que se destacam na atmosfera: absorção molecular e absorção por aerossóis.

Absorção molecular – A atenuação ocasionada por absorção molecular é resultante da interação do feixe de luz, com constituintes próprios da atmosfera, como O_2 (oxigênio), H_2O (água), CO_2 (gás carbônico) e O_3 (ozônio). Os coeficientes de absorções moleculares dependem do tipo de moléculas e de sua concentração. A natureza do espectro de absorção advém de possíveis variações nos níveis de energia dentro das massas de gás, ocasionadas por rotações das moléculas e vibrações de átomos [8]. Um aumento na pressão ou temperatura tenderá a aumentar o espectro de absorção, devido à excitação dos níveis de energia. As absorções moleculares, por meio das gotas de água (H_2O), ozônio (O_3) e gás carbônico (CO_2), caracterizam-se por serem fortes em determinados comprimentos de ondas, dificultando a transmissão. Por exemplo, os comprimentos de onda de 700 nm a 1600 nm são absorvedores de moléculas de água, conforme pode ser observado na Figura 2.3.

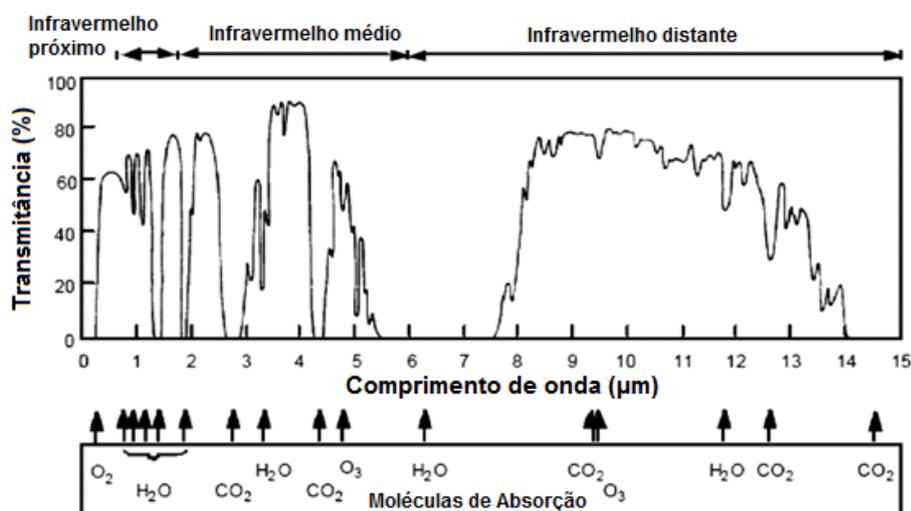


Figura 2.3 – Transmissão da atmosfera, devido à absorção molecular [22].

As faixas entre 780 nm e 850 nm e 1520 nm e 1600 nm apresentam baixa absorção dessas moléculas. Esta última faixa ainda apresenta outra vantagem que é a maior intensidade de potência emitida associada a um grau aceitável de segurança aos olhos, útil à aplicação de sistemas FSO [6]. Destaca-se ainda que, nas janelas comerciais específicas de 850 nm e 1550 nm, geralmente utilizadas em sistemas FSO, estes efeitos não influenciam a transmissão de forma significativa.

Absorção por aerossóis – A absorção ocasionada por aerossóis, tais como partículas marítimas (constituídas por gotículas de água, cristais salinos e partículas de origem continental), poeira e neblinas, com diâmetros que variam entre 0,01 μm e 100 μm , influencia a transmissão do feixe de luz em função de sua composição e tamanho [11].

O coeficiente de absorção é dado por

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a\left(\frac{2\pi}{\lambda}, n''\right) (\pi r^2) \frac{dN(r)}{dr} dr, km^{-1}, \quad (2.4)$$

na qual, λ é o comprimento de onda em μm ; $\frac{dN(r)}{dr}$ é a distribuição do tamanho da partícula por unidade de volume em cm^{-4} ; n'' é a parte imaginária do índice de refração, n , do aerossol considerado; r é o raio das partículas em cm ; $Q_a\left(\frac{2\pi}{\lambda}, n''\right)$ é a seção eficaz de absorção para um dado tipo de aerossol.

A seção eficaz de absorção depende do tamanho da partícula, índice de refração e do comprimento de onda da radiação incidente [8].

O índice de refração do aerossol está associado as variações da velocidade de propagação da luz em um meio em relação ao vácuo e depende da composição química do aerossol e do comprimento de onda do feixe. Pode ser representado por

$$n = n' + n'', \quad (2.5)$$

na qual, n' e n'' são, respectivamente a capacidade de espalhamento e a potência de absorção da partícula. A parte imaginária representada por n'' possui valor baixo nos espectros de luz visível e infravermelho próximo e pode ser desprezada [8].

Espalhamento

O espalhamento corresponde ao redirecionamento da luz. Há dois tipos que se destacam: espalhamento Rayleigh e espalhamento Mie. Eles se caracterizam pelo diâmetro das partículas que colidem com o feixe de luz, em comparação com seu comprimento de onda, conforme observado na Figura 2.4.

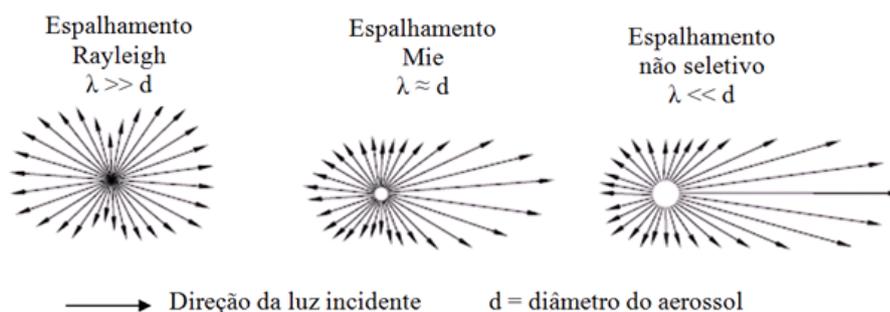


Figura 2.4 – Representação de colisões entre o feixe de luz e partículas dispersas no ar. Adaptada de [11].

Espalhamento Rayleigh – O espalhamento Rayleigh, também conhecido por espalhamento molecular [8], ocorre quando há interação do feixe de luz com partículas que possuem um diâmetro menor que o comprimento de onda do feixe. O coeficiente de dispersão é proporcional a $\left(\frac{1}{\lambda^4}\right)$, que é conhecida como Lei de Rayleigh. Logo, em comprimentos de onda mais curtos, o feixe é mais espalhado. A luz azul é espalhada cerca de 10 vezes mais que a luz vermelha; o céu é azul devido a esse efeito [12], [23]. Após a colisão, há um desequilíbrio de cargas nas partículas, que passam a variar na mesma frequência da radiação do feixe incidente e os elétrons que estão em oscilação irradiarão o feixe em forma de onda espalhada [24]. A representação matemática deste espalhamento é dada por

$$\beta_r = \frac{f e^{-4} \lambda_0^4}{6\pi \epsilon_0^2 m^2 c^4 \lambda^4}, \quad (2.6)$$

em que, f corresponde à força do oscilador, ou seja, à força para transição de um átomo de um estado quântico a outro; e é a carga do elétron; λ_0 é o comprimento de onda, relacionado à frequência natural $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$; ϵ_0 é a constante dielétrica; λ é o comprimento de onda; c é a velocidade de propagação da luz no vácuo e m é a massa do elétron que está oscilando. Este espalhamento destaca-se nas faixas do ultravioleta e visível.

Espalhamento Mie – O espalhamento Mie caracteriza-se pela relação das partículas com o comprimento de onda do sinal, que são da mesma ordem ou inferiores às dimensões das partículas, tais como, aerossóis, poeira, neblina e nevoeiro. Na medida em que o diâmetro das partículas ultrapassa o comprimento de onda do feixe, o espalhamento torna-se constante e independente do comprimento de onda, ou seja, não seletivo. A absorção por essas partículas domina o espectro, logo, se torna difícil medir e identificar apenas o espalhamento Mie. É necessário conhecer a distribuição das partículas dispersas que, no que se refere a aerossóis, são caracterizadas por posição, velocidade de ventos, entre outras [24]. Empiricamente, essa interação pode afetar bastante o projeto de um enlace óptico no espaço livre em situações de nevoeiro [24], tendo em vista que os comprimentos de onda de interesse desse sistema são afetados por esse espalhamento [6].

Analicamente, pode-se representar o espalhamento Mie de acordo com [13]

$$\beta_n = \left(\frac{3,91}{V} \right) \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}, \quad (2.7)$$

em que, λ é o comprimento de onda em nm; V é visibilidade em km e q é o fator de distribuição do tamanho da partícula que causa o espalhamento. O fator q pode assumir os seguintes valores:

- ▣ 1,6 – para $V > 50$ km;
- ▣ 1,3 – para $6 < V < 50$ km;
- ▣ $0,16V + 0,34$ – para $1 < V < 6$ km;
- ▣ $V - 0,5$ – para $0,5 < V < 1$ km;
- ▣ 0 – para $V < 0,5$ km.

Levando em consideração as condições do espalhamento Mie, a Figura 2.5 representa a curva de atenuação provocada por este espalhamento, para os comprimentos de onda de 785 nm e 1550 nm, em função das visibilidades mínimas predominantes nos meses de abril a maio de 2012, de acordo com dados obtidos no Aeroporto Eduardo Gomes, em Manaus/AM.

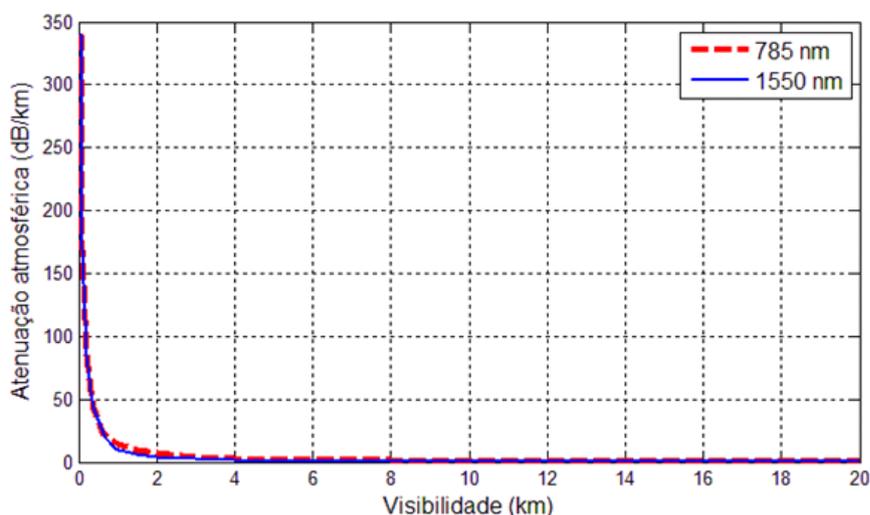


Figura 2.5 – Atenuação em função da visibilidade por espalhamento Mie, para comprimentos de onda de 785 nm e 1550 nm.

Pela Figura 2.5, observa-se que quanto maior a visibilidade, menores são as perdas; o comprimento de onda de 1550 nm apresenta valores de perda pouco inferiores aos apresentados em 785 nm, para visibilidades superiores a 500 m, comportamento semelhante ao apresentado em [11]. De acordo com o modelo apresentado por [13] para o espalhamento Mie, os valores apresentados para o fator de distribuição do tamanho da partícula de espalhamento (q) não apresentam dependência com o comprimento de onda em situações de nevoeiro denso, abaixo

de 500 m. Ou seja, para este espalhamento, independente do comprimento de onda utilizado, o resultado possui o mesmo valor de perda em condições de elevadas perturbações atmosféricas (baixa visibilidade). Em [25], de acordo com os resultados obtidos experimentalmente para vários comprimentos de onda, é destacada a necessidade de considerar os tipos de nevoeiros densos. Os autores de [25] consideraram o cenário de baixa visibilidade entre 50 m e 1000 m, e comprimentos de onda entre 690 nm e 1550 nm. Com base nisso, eles analisam a influência de nevoeiros de advecção e radiação no desempenho do enlace obtendo, respectivamente:

$$\gamma_A(\lambda) = \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V}, \quad (2.8)$$

$$\gamma_R(\lambda) = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7502}{V}, \quad (2.9)$$

em que, V , é visibilidade em km, γ_A e γ_R correspondem à atenuação para nevoeiro por advecção e radiação, respectivamente.

A Figura 2.6 mostra as curvas de atenuação para valores de visibilidade mínima, predominante entre 50 m e 1000 m, de acordo com dados obtidos no Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, fornecidos pelo ICEA, e registrados nos meses de abril a julho de 2013.

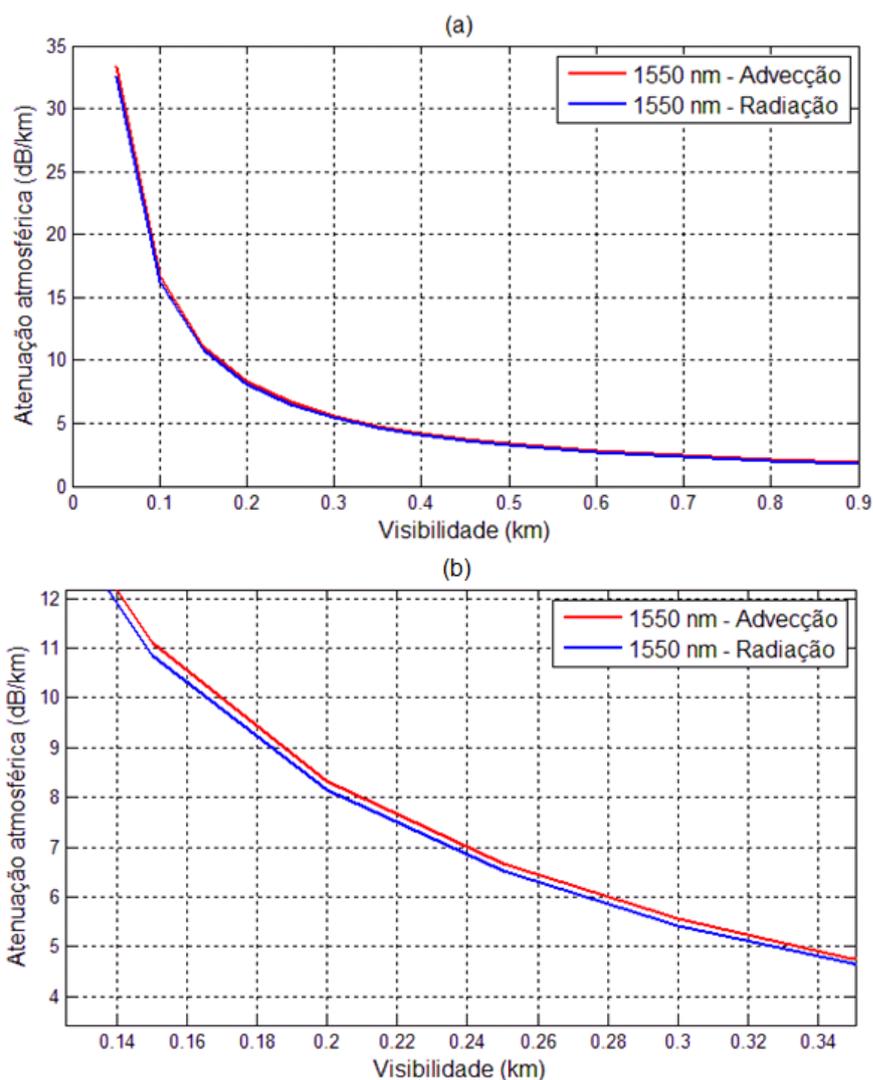


Figura 2.6 – Atenuação em função da visibilidade mínima predominante no Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, registradas nos meses de abril a julho de 2013, para nevoeiros densos por advecção e radiação, no comprimento de onda de 1550 nm. (a) Gráfico simulado. (b) Gráfico simulado (zoom).

De acordo com a Figura 2.6 é possível observar uma diferença, apesar de pequena, entre os valores de atenuação para os nevoeiros por advecção e radiação.

2.3.2 – Atenuação Geométrica

A atenuação geométrica decorre da divergência do feixe de luz transmitido. Uma parte é recebida no receptor e a outra se perde no espaço. A partir do momento em que o feixe se afasta do transmissor, ele tende a ser desviado por espalhamento espacial, tendo em vista a teoria da difração [22].

A divergência do feixe óptico provoca um aumento da área da sua seção reta, na medida em que se distancia da transmissão, de acordo com o ângulo de divergência. Logo, o diâmetro do feixe ao chegar ao receptor é bem maior que aquele apresentado na transmissão e isto acarreta a

absorção de apenas uma porcentagem do sinal, em relação ao seu valor inicial, pelo equipamento de recepção.

Desta forma, a atenuação geométrica pode ser definida analiticamente como [26]

$$A_g = \frac{S_R}{S_T + \frac{\pi}{4}(\theta R^2)}, \quad (2.10)$$

em que, S_R é a área da superfície da lente do receptor e S_T é a área da superfície da lente do transmissor, ambas em m^2 ; θ é o ângulo de divergência, geralmente na ordem de 10^{-3} radianos (mrad), e R é a distância do enlace em metros. A Figura 2.7 representa a atenuação geométrica em função da distância do enlace, considerando as áreas das lentes do receptor e transmissor iguais a $0,031 m^2$ e $0,001 m^2$, respectivamente e o ângulo de divergência igual a 1 miliradiano (mrad).

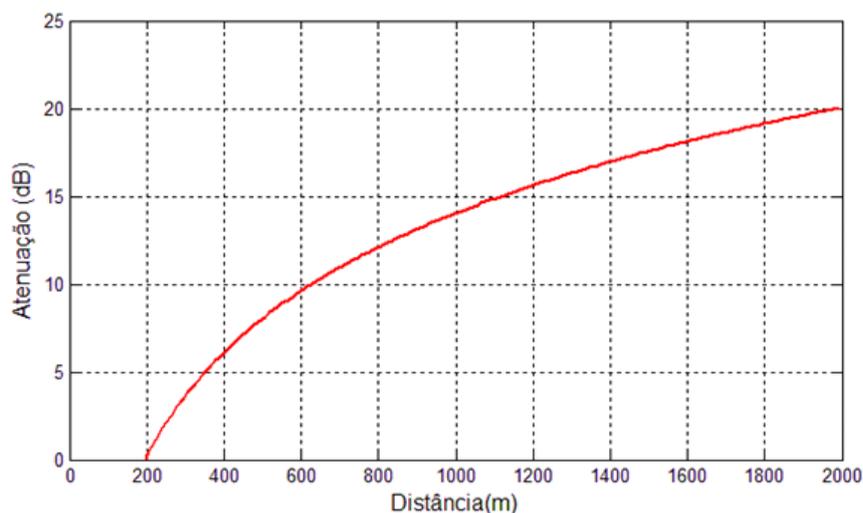


Figura 2.7 – Atenuação geométrica em função da distância do enlace.

A Figura 2.7 mostra que, na medida em que há um aumento na distância do enlace, conseqüentemente, a atenuação geométrica também aumenta. Este resultado é compatível com os valores de atenuação apresentados em [4] e [11], para os dados apresentados.

2.3.3 – Atenuação por Chuvas

Os enlaces ópticos no espaço livre também podem ser influenciados pelas chuvas que, em determinados níveis de precipitação, assemelham-se a interferências ocasionadas por nevoeiro, que por sua vez são os fenômenos que mais provocam espalhamentos de feixe. As perdas para taxas de precipitação iguais a 100 mm/h, 25 mm/h, 12,5 mm/h, 20,5 mm/h e 0,25 mm, assemelham-se aos valores obtidos em nevoeiros leve e fino, neblina, ar limpo e ar muito limpo [26]. Essa relação é apresentada por meio do Código Internacional de Visibilidade, no Quadro 2.1. Apesar de não exercer influência da mesma magnitude que o nevoeiro, na faixa do

infravermelho próximo, no infravermelho distante, em que há uma forte absorção de moléculas de água, o sinal poderá ser atenuado de forma significativa [24].

De acordo com a relação de Carbonneau [8], a atenuação por precipitação pode ser dada por

$$A_c = 1,076R_p^{0,67}, \quad (2.11)$$

na qual, A_c e R_p correspondem, respectivamente, à atenuação por chuvas e ao nível de precipitação. Na Figura 2.8 são apresentadas as curvas de atenuação em função de precipitações obtidas para os meses em que ocorreram valores de precipitação horária máxima no ano de 2012: 36,2 mm/h, no mês de janeiro, de acordo com dados obtidos no Aeroporto Castro Pinto, em João Pessoa, e 90 mm/h em abril, de acordo com dados obtidos no Aeroporto Eduardo Gomes, em Manaus.

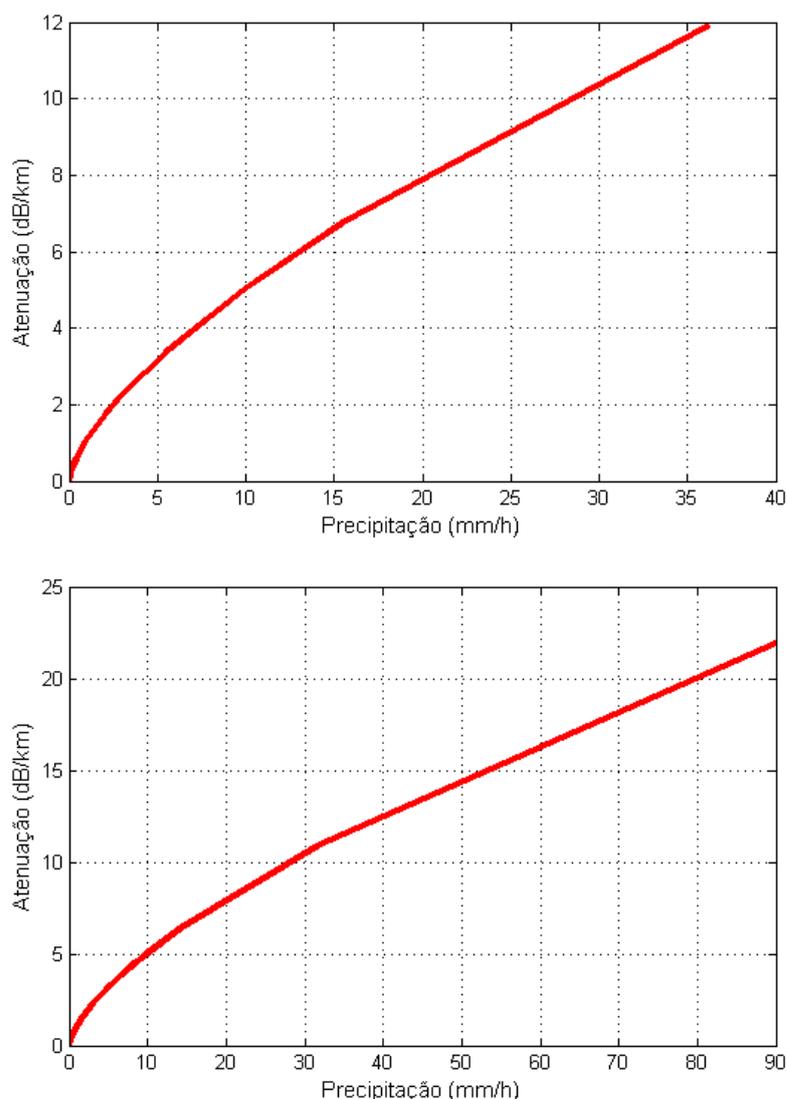


Figura 2.8 – Atenuação em função da precipitação: (a) Aeroporto Castro Pinto, em João Pessoa, no mês de janeiro/2012 e (b) Aeroporto Eduardo Gomes, em Manaus, no mês de abril/2012.

Em Manaus, cidade historicamente conhecida pelo nível elevado de chuvas, foram obtidos valores de atenuação por precipitação maiores em 2012, em comparação aos obtidos para a cidade de João Pessoa, no mesmo ano.

Quadro 2.1 – Código Internacional de Visibilidade [26].

Condições do Tempo	Chuvas		Visibilidade
	Tipo de precipitação	Precipitação (mm/h)	
Nevoeiro denso			0 m
			50 m
Nevoeiro grosso			200 m
Nevoeiro moderado			500 m
Nevoeiro leve	Tempestade	100	770 m
			1 km
Nevoeiro fino	Chuva forte	25	1,9 km
			2 km
Neblina	Chuva média	12,5	2,8 km
			4 km
Neblina fina	Chuva fraca	2,5	5,9 km
			10 km
Limpo	Garoa	0,25	18,1 km
			20 km
Muito limpo			23 km
			50 km

2.3.4 – Turbulência

Além dos fenômenos ópticos apresentados, há ainda a turbulência atmosférica, que são bolsões de ar ou células turbulentas, gerados na atmosfera devido ao calor transferido ao ar por estruturas, como paredes, prédios, entre outras. A transferência de energia ocasiona a formação de bolsas de ar quente, que poderão influenciar a propagação dos feixes de luz no espaço livre, tendo em vista que possuem diferentes valores de temperatura, umidade e pressão, que provocam variações no índice de refração do ar, ocasionando erros nas transmissões em espaço livre [27]. A teoria da turbulência de Kolmogorov é um dos principais modelos que caracterizam a turbulência atmosférica. Essa teoria considera a atmosfera como um fluido viscoso, que apresenta dois estados de movimento: laminar e turbulento. A distinção entre esses estados está no fato de que no fluxo laminar não ocorre mistura, as características de velocidade são uniformes. No fluxo turbulento, a velocidade não mantém suas características uniformes, devido à dinâmica da mistura do fluxo que gera subfluxos aleatórios, conhecidos como turbilhões [12].

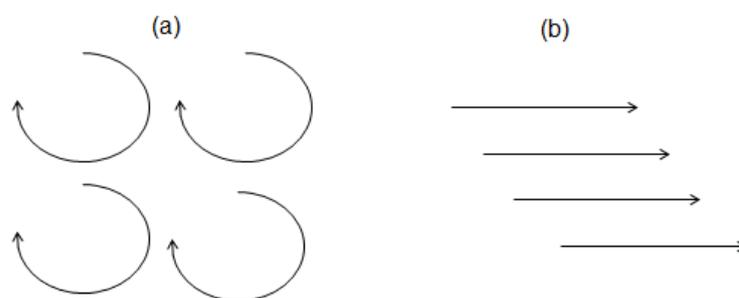


Figura 2.9 – (a) Fluxo de ar turbulento. (b) Fluxo de ar laminar.

A transição do fluxo laminar para o fluxo turbulento ocorre quando se obtém um número crítico de Reynolds [12], a partir do qual o movimento passa a ser considerado como turbulento $R_e \sim 10^5$. O número de Reynolds corresponde a uma quantidade adimensional, representada por [12]

$$R_e = \frac{Vl}{\nu}, \quad (2.12)$$

na qual, V é a velocidade do fluxo, em m/s, l é a dimensão do fluxo em m, e ν é a viscosidade cinemática, em m^2/s .

Os valores dos parâmetros que caracterizam o fluxo como em estado de turbulência elevada, são $l \sim 2$ m, V entre 2 e 5 m/s e $\nu \sim 0,15 \times 10^{-4}$ em m^2/s .

Uma importante ferramenta para compreensão da estrutura da turbulência é a teoria da cascata de energia da turbulência [12]. Segundo ela, a velocidade dos ventos aumenta até atingir um ponto em que exceda o valor do número crítico de Reynolds. Isso gera turbilhões ou células (massas de ar instáveis), com dimensões menores e independentes do fluxo principal e com a influência de forças inerciais, que na atmosfera ocorrem pelo cisalhamento do vento. Turbilhões maiores dividem-se em escalas menores e há a transferência de energia dos turbilhões maiores para os menores [12], [27]. Esse cascadeamento de energia prosseguirá até que os turbilhões tenham comprimentos equiparáveis às dimensões da escala interna l_0 [28].

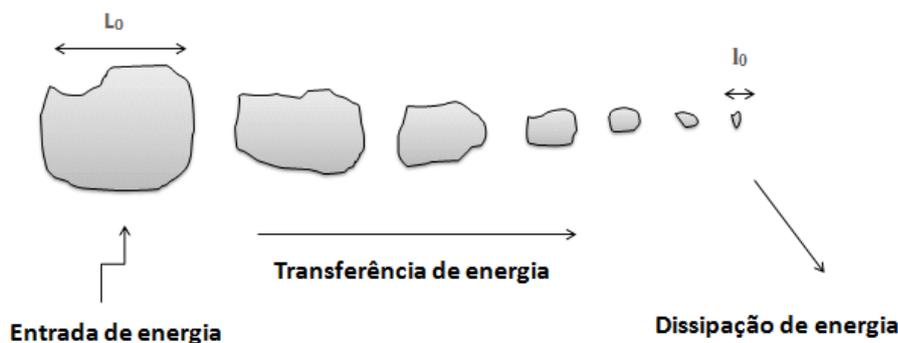


Figura 2.10 – Transferência de energia pelas células turbulentas. Adaptada de [29].

As células turbulentas possuem um tamanho máximo, conhecido como escala de turbulência externa (L_0) e uma dimensão mínima (l_0), escala de turbulência interna. Quando

as células atingem um valor inferior a (l_0), elas deixam de transferir energia e passam a dissipá-la em calor. O número de onda espacial do fluxo turbulento é dado por $k = 2\pi/l$, na qual l é o comprimento do turbilhão. A transferência de energia iniciará a partir de turbilhões, cujo comprimento seja maior que a escala externa L_0 ($k_0 = 2\pi/L_0$) [28]. Caracteristicamente, a escala interna varia entre 1 e 10 milímetros (mm), próximo ao solo e na ordem de centímetros (cm) ou mais na troposfera e estratosfera. E a escala externa pode chegar a quilômetros, a partir da camada de superfície até uma altura de 100 m. Assume-se que o tamanho da escala externa cresce linearmente. Acima dos 100 m, devido à dimensão horizontal torna-se maior que à vertical, devido a estratificação [12], [27]. Para se obter a dimensão exata dessas escalas, seria necessário conhecer as características internas de cada turbilhão em tempo real, mas isso seria impraticável. Deste modo, alguns modelos assumem $L_0 \sim \infty$ e $l_0 \sim 0$ [27]. A parte intermediária do espectro, localizada entre a escala externa e interna, é conhecida como subdomínio inercial [28]. Nela não há introdução, nem dissipação direta de energia, o fluxo é independente do comprimento l e a sua importância está na transferência de energia inercial.

Parâmetro de estrutura de velocidade (Flutuação na velocidade)

A teoria clássica de turbulência de Kolmogorov baseia-se em flutuações aleatórias de magnitude e direção da velocidade dos fluidos. Essa teoria considera que para os casos em que o número de Reynolds é elevado, as estruturas de pequena escala da turbulência são isotrópicas, homogêneas e independentes das estruturas de grande escala [12]. Utilizando a análise dimensional de Kolmogorov, o parâmetro de estrutura da velocidade (C_v^2), pode ser obtido a partir da função de estrutura longitudinal da velocidade dos ventos.

$$D = (V_1 - V_2)^2 = C_v^2 R^{2/3}, \quad (2.13)$$

na qual, D é a função de estrutura longitudinal da velocidade dos ventos, V_1 e V_2 são a velocidade dos ventos em m/s^2 , localizados em dois pontos separados por uma distância R . C_v^2 é o parâmetro de estrutura de velocidade, dado em $m^{4/3}/s^2$, que mede a quantidade de energia total na turbulência.

O parâmetro de estrutura C_v^2 está relacionado à taxa de dissipação de energia, ϵ , dada por

$$C_v^2 = 2\epsilon^{2/3}. \quad (2.14)$$

De acordo com o modelo de Kolmogorov [12], a escala interna, l_0 , pode ser dada, em função da taxa de dissipação, por

$$l_0 \sim n = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4}, \quad (2.15)$$

na qual, n é a microescala de Kolmogorov, na ordem de 1 mm e ν é a viscosidade do ar. Essa dependência da escala interna em relação à taxa de dissipação mostra que, em fortes

turbulências, há a presença de escala interna no fluxo, com dimensões menores, e em turbulência fraca, há escalas internas em dimensões maiores.

Parâmetro de estrutura do índice de refração do ar (Flutuações no índice refração)

O índice de refração é um dos parâmetros mais importantes na propagação de luz no meio atmosférico. No espectro visível e infravermelho próximo, as pequenas flutuações do índice de refração estão relacionadas principalmente, com variações na temperatura, que ocorrem na ordem de 0,1 a 1 °C , ocasionadas pela movimentação turbulenta do fluxo. Elas também estão relacionadas à pressão atmosférica no entanto, ela poderá ser desprezível, caso suas flutuações sejam medidas próximo ao solo em um ponto fixo, pois serão mínimas e rapidamente dispersas [28]. Em geral, as flutuações dos índices de refração são da ordem de 10^{-6} [28]. Analiticamente, o índice de refração para comprimentos de onda, localizados no espectro infravermelho, é representado por [12]

$$n(R) \approx 1 + 79 \times 10^{-6} \frac{P(R)}{T(R)}, \quad (2.16)$$

na qual, P é a pressão em milibares (mbar) e T é a temperatura em Kelvin. A Figura 2.11 representa a variação do índice de refração do ar em relação a um, a partir da Fórmula aproximada 2.16, em intervalos de 3 horas a partir de (00 h - 21 h), ao longo do dia 04/01/2010, na estação meteorológica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizada no bairro de Bonji, em Recife/PE.

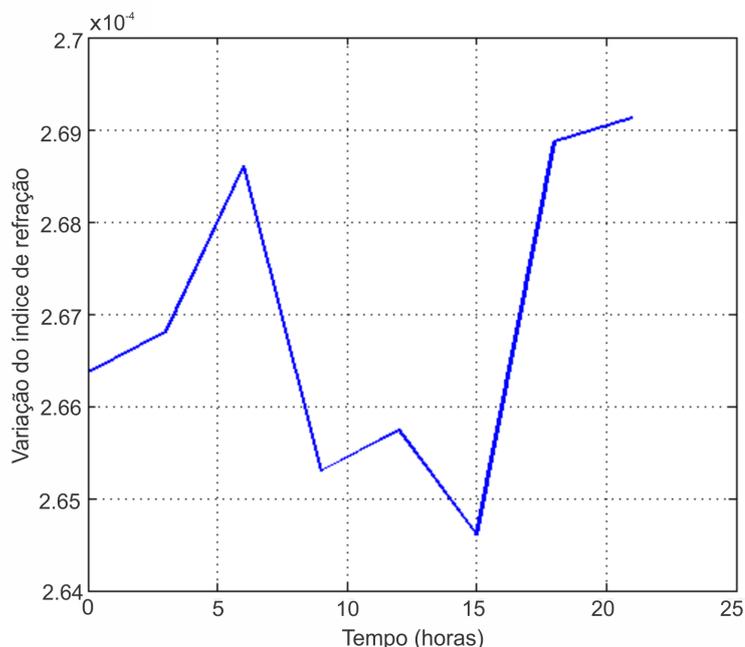


Figura 2.11 – Variação do índice de refração do ar em relação a um, ao longo do dia 04/01/2010, em estação meteorológica do INPE (Recife/PE).

Na Figura 2.11, é possível observar os valores mínimos de variações do índice de refração, entre o período das 9 horas da manhã às 15 horas da tarde, considerado o período mais

ensolarado e comumente sujeito a maiores temperaturas [4], [29], o que torna o ar menos denso e consequentemente sujeito a menores valores do índice de refração. O parâmetro de estrutura do índice de refração é conceituado fisicamente, por medida da intensidade de flutuação do índice de refração e ele pode ser representado analiticamente por

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right)^2 C_T^2, \quad (2.17)$$

em que, P é a pressão em mbar, T é a temperatura em Kelvin e C_T^2 é o parâmetro de estrutura da temperatura, representado por

$$C_T^2 = \frac{(T_1 - T_2)^2}{R^{2/3}}, \quad (2.18)$$

em que, T_1 e T_2 são temperaturas em Kelvin, medidas por termômetros localizados em dois pontos separados por uma distância R , em metros [11].

A Figura 2.12 apresenta os resultados de medições obtidos na cidade da Flórida, EUA. Vê-se que os picos dos valores do parâmetro de estrutura do índice de refração ocorrem durante o dia. Nos horários próximos e após o pôr do sol, os valores são baixos [12].

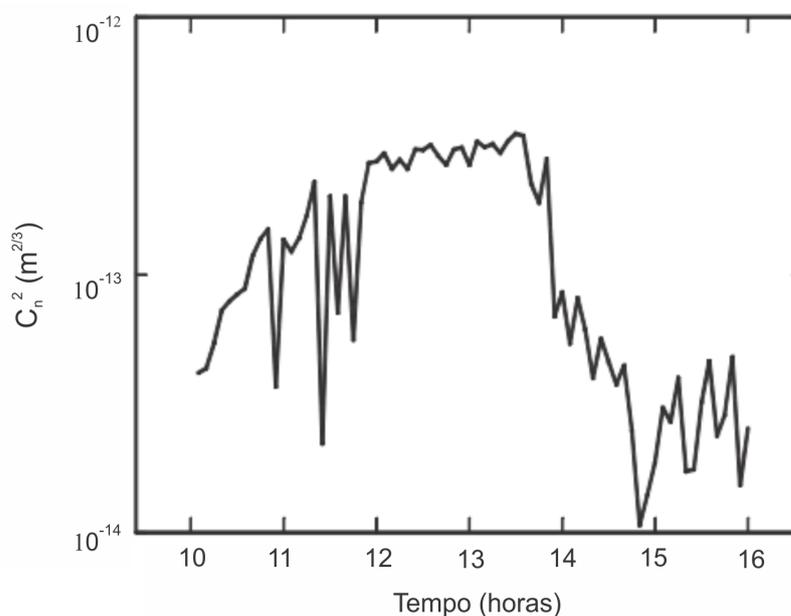


Figura 2.12 – Parâmetro de flutuação do índice de refração, medido na cidade da Flórida, a 1,5 m do solo para uma distância de enlace de 150 m [4].

Os valores do parâmetro de estrutura do índice de refração diminuem com o aumento da altitude e apresentam picos elevados, durante o dia. Ele é importante no cálculo da atenuação ocasionada por turbulência, em enlaces ópticos, pois demonstra o peso dos efeitos da turbulência no feixe de luz transmitido nos sistemas FSO. Esse parâmetro pode ser medido com um equipamento chamado cintilômetro, que apresenta a velocidade dos ventos, valores de C_n^2 e de tensões dos canais, detectados pelo receptor [11].

2.3.5 – Principais Efeitos Ocasionados pela Turbulência em Enlaces Ópticos

A turbulência atmosférica pode ocasionar efeitos no feixe óptico, tais como flutuações na intensidade do feixe (cintilação) e deslocamento aleatório do feixe. Esses efeitos são analisados a seguir.

Cintilação

A cintilação ocasiona variações na potência óptica do feixe, ou seja, alterações na intensidade da luz transmitida em um sistema FSO, devido à colisão com células turbulentas, cujas dimensões são inferiores ao diâmetro do feixe. O sinal sofre flutuações, influenciado pelas mudanças provocadas termicamente no índice de refração do ar. Como resultado, as componentes da onda são detectadas pelo receptor em tempos diferentes. Em casos de turbulências fracas, as oscilações seguem a variância de Rytov σ_i^2 , para uma onda plana [11]

$$\sigma_i^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} R^{11/6}, \quad (2.19)$$

em que, k é o número de onda, R é a distância em metros e C_n^2 é a medida de intensidade de flutuação. A Figura 2.11 apresenta os dados resultantes da atenuação provocada por cintilação, para um valor de C_n^2 igual a $10^{-14} m^{-2/3}$, para os comprimentos de onda de 785 nm, 850 nm e 1550 nm, usando a Fórmula 2.19.

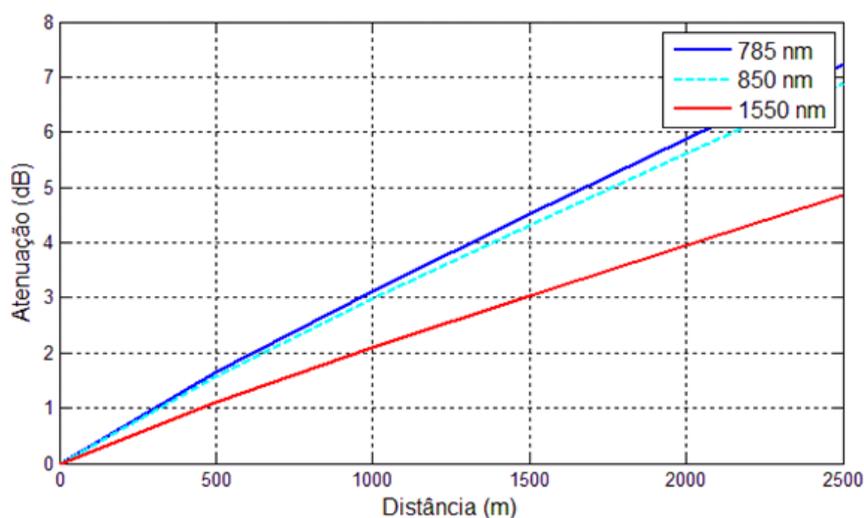


Figura 2.13 – Atenuação devido à cintilação em 785 nm, 850 nm e 1550 nm e C_n^2 de $10^{-14} m^{-2/3}$.

De acordo com a Figura 2.13, o comportamento dos comprimentos de onda é semelhante ao obtido em [11], e o melhor desempenho observado foi para o comprimento de onda de 1550 nm.

Deslocamento Aleatório do Feixe

O deslocamento aleatório do feixe é ocasionado por células turbulentas de ar, com dimensões superiores ao diâmetro do feixe óptico. Essas células funcionam como lentes, refletindo aleatoriamente o feixe, mas não alterando de forma significativa o seu diâmetro. Em outras palavras, ele provoca um desvio do ponto focal do feixe. Esse efeito está ilustrado na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Deslocamento aleatório do feixe provocado por células turbulentas [26].

A expressão da variância radial, em m^2 , do deslocamento aleatório do feixe pode ser representada por [26]

$$\sigma_r = 1,83C_n^2\lambda^{-1/6}L^{17/6}, \quad (2.20)$$

em que, C_n^2 é o parâmetro estrutural do índice de refração, λ é o comprimento de onda do feixe em m e L corresponde à distância do enlace em m.

Por meio da Fórmula 2.20, é possível observar na Figura 2.15 as perdas ocasionadas pelo deslocamento aleatório do feixe.

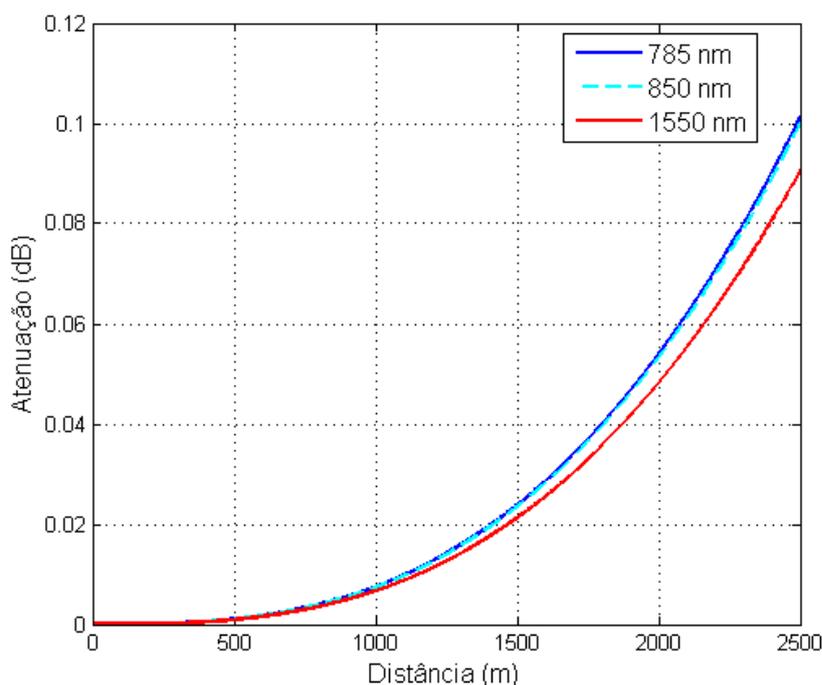


Figura 2.15 – Atenuação devido ao deslocamento aleatório do feixe em 785 nm, 850 nm e 1550 nm.

Da Figura 2.15, é possível observar por meio dos menores valores de atenuação obtidos, que os comprimentos de onda maiores apresentam menor desvio do seu feixe. O comprimento de onda de 1550 nm apresenta melhor desempenho, quando sujeito a este efeito.

2.4 – Algumas Técnicas para Redução dos Principais Efeitos sobre o Enlace Óptico no Espaço Livre

As principais empresas fabricantes de transceptores FSO têm se empenhado na busca de soluções para mitigar os efeitos sobre o enlace óptico no espaço livre, e desta forma, aumentar a confiabilidade e disponibilidade desses sistemas. Algumas dessas técnicas são descritas a seguir.

Nevoeiro: Para prevenir interrupções em locais que apresentam historicamente nevoeiro denso, a utilização em curtas distâncias ou o uso de redundâncias são alternativas. Um dos principais exemplos é a utilização de enlaces ópticos no espaço livre em conjunto com rádios de 60 e 80 GHz. Em situações de extremo nevoeiro e interrupção do feixe de luz, esses rádios de redundância assumiriam a transmissão, fornecendo taxas de transmissão de acordo com sua capacidade.

De acordo com um dos fabricantes, a utilização de enlaces nessa configuração tem sido promissora em cidades de intenso nevoeiro como São Francisco, EUA [30].

Absorção: Ocorre de forma mais intensa em alguns comprimentos de onda. Nesse caso, há a possibilidade de optar por comprimentos de onda que sejam menos influenciados por

esse efeito. As empresas estão atentas a isso e têm buscado projetar enlaces em comprimentos de onda mais adequados. Além disso, a utilização de uma potência adequada ao local e utilização da diversidade espacial, por meio de múltiplos feixes sendo transmitidos por meio de unidades transmissoras e receptoras, auxiliam na manutenção da disponibilidade.

Obstruções físicas: Obstruções ocasionadas pela passagem de pássaros ou outros bloqueios temporários podem ocasionar a interrupção do enlace em um curto intervalo de tempo. A utilização de transceptores em diversidade espacial com transmissão de múltiplos feixes de luz ao mesmo tempo é uma alternativa para manter a disponibilidade. Na quinta geração dos sistemas FSO, os fabricantes têm projetado transceptores com capacidade para emitir até quatro feixes de luz de transmissão e recepção em ambas as unidades, totalizando oito feixes sendo transmitidos em cada unidade. Deste modo, caso um dos feixes seja influenciado por alguma obstrução temporária, ele se manterá disponível por meio dos demais feixes.

Abalos nas edificações: Um dos principais desafios dos enlaces ópticos no espaço livre é o alinhamento do feixe. O feixe diretivo, conforme mencionado, contribui para o aumento da densidade de potência recebida. No entanto, este feixe está sujeito a desalinhamentos em situações de abalos nas estruturas em que o sistema esteja instalado. A técnica para alinhamento do feixe pode utilizar lentes monitoradas dentro dos transceptores, tornando o processo mais rápido, ou utilizar um motor para movimentar a unidade, tornando o processo mais lento. O uso do motor é a forma mais comum em situações de maiores desalinhamentos ocasionados pela instalação em estruturas mais instáveis, como torres [30], [31].

Deslocamento aleatório do feixe por turbulências: Esse efeito não apresenta a intensidade de influência dos efeitos de cintilação, tendo em vista que a formação de bolsões de ar de pequenas dimensões ocorrem de forma rápida.

Cintilação: A cintilação é um dos principais efeitos ocasionados pela interação dos feixes de luz com as massas de ar turbulentas. As técnicas mencionadas por fabricantes e a literatura, indicam que para situações de forte turbulência, deve-se usar feixes múltiplos, fontes luminosas potentes, aumento da abertura do feixe ou mesmo diminuição do alcance do enlace. No entanto, uma técnica que tem se destacado para mitigar esses efeitos se baseia na óptica adaptativa, que corresponde à inclusão de sinais anti-ruído ao feixe que, deste modo, cancela as perturbações que prejudicam o sinal ao longo da atmosfera turbulenta [11], [31].

Balanço de Potência para Enlaces Ópticos no Espaço Livre

Na literatura atual, os pesquisadores têm mostrado maior interesse na análise das comunicações ópticas no espaço livre, tendo em vista as vantagens que este sistema possui no atual contexto das telecomunicações, conforme discutido no Capítulo 1. A análise das condições esperadas em um enlace é um fator muito importante em sua implementação. Os próprios fabricantes de transceptores FSO [16] afirmam que o desempenho e disponibilidade dos enlaces serão dependentes das condições climáticas do local de instalação. Com base nisto, pesquisas têm sido realizadas considerando as condições adversas que o canal atmosférico apresenta ao desempenho do enlace.

Alguns trabalhos se destacam na análise de desempenho de enlaces FSO no Brasil, tais como o realizado em [4], em que são analisados os efeitos ocasionados por perdas geométricas, por cintilação e em função da baixa visibilidade, para enlaces estabelecidos entre os Aeroportos do Galeão e Santos Dumont, no Rio de Janeiro.

Outro trabalho que se destaca nesse aspecto é o apresentado em [11], no qual é realizada uma análise dos enlaces ópticos no espaço livre, considerando as condições observadas nos Aeroportos do Galeão, no Rio de Janeiro e Eduardo Gomes, em Manaus, para condições climáticas registradas durante um ano nessas localidades.

Em [22] é apresentado o desempenho de um enlace óptico no espaço livre, instalado no Instituto Militar de Engenharia (IME), sob as condições climáticas do Rio de Janeiro. São analisadas as condições de visibilidade e cintilação, registradas no Aeroporto do Galeão.

Em âmbito internacional, pesquisadores também têm trabalhado com enlaces ópticos no espaço livre, com base nos efeitos ocasionados pelas condições adversas da atmosfera. Em [32], o autor analisa o desempenho de um enlace óptico no espaço livre, instalado sob as condições atmosféricas de alguns países da Europa. Para isto ele se baseia em dados de visibilidade coletados em alguns Aeroportos, apresentando o alcance do sistema nas localidades.

Pesquisas têm sido realizadas no País nesse aspecto, no entanto, em sua maioria, sob situações de uma ou no máximo duas cidades localizadas geralmente na região sudeste ou norte do País, ou mesmo desconsiderando o uso de dados resultantes de características reais dos efeitos. Além disso, no cálculo da influência dos efeitos, geralmente tem sido desconsiderada a ação de todos os efeitos ocorrendo conjuntamente. Conforme discutido no Capítulo 2, os efeitos dificilmente ocorrem de forma isolada.

Este capítulo apresenta balanços de potência para enlaces ópticos no espaço livre, simulados em vários cenários, representados por cidades das cinco regiões brasileiras. Para isto, são analisadas inicialmente as condições climáticas, observadas no período de 2010 a 2012, em cada localidade, que servirão para validar a simulação de resultados do balanço de potência em um sistema instalado nesses locais, considerando o maior número de efeitos ocorrendo simultaneamente.

3.1 – Balanço de Potência

A análise das condições esperadas de um enlace de comunicação óptica no espaço livre, assim como nas demais tecnologias, é uma etapa importante para o projeto do sistema. O balanço de potência apresenta o alcance de um enlace com base na potência transmitida e sensibilidade do receptor, sujeitas às perdas dos componentes do sistema e do canal de transmissão. Conforme discutido no Capítulo 2, o meio de transmissão do sinal óptico em sistemas FSO é a atmosfera, e ela é sujeita às condições adversas do meio, o que torna os sistemas dependentes das condições climáticas do local de instalação.

Perdas geradas na atmosfera, por meio de atenuações atmosféricas, geométricas e turbulências, fazem com que a potência luminosa recebida seja inferior à potência transmitida pelo transceptor. No entanto, essa potência deve ser suficiente para ser detectada no receptor. O balanço de potência para enlaces ópticos no espaço livre, que considera as principais perdas de um sistema FSO é dado por [4]

$$P_{Rx} = P_{Tx} - \sum L - M_s, \quad (3.1)$$

em que, P_{Rx} e P_{Tx} são, respectivamente, as potências de recepção e transmissão, em dBm, M_s , corresponde à margem de segurança do sistema em dB, e L , corresponde aos valores de perda do enlace. O valor total das perdas pode ser representado por

$$\sum L = L_{Atm} + L_{Ch} + L_{Cint} + L_{Geom} + L_{Dsl}, \quad (3.2)$$

em que, L_{Atm} , L_{Ch} , L_{Cint} , L_{Geom} e L_{Dsl} , correspondem, respectivamente, a perdas ocasionadas por atenuações atmosféricas, por chuvas, por cintilação, geométricas e por deslocamento aleatório do feixe, em dB. O menor valor aceitável da potência de recepção é determinado em função da sensibilidade do receptor. A margem de segurança é adotada no projeto, para garantir que mesmo com o envelhecimento e aquecimento dos componentes ópticos, ou mesmo outros fatores que diminuam a potência do sinal transmitido como desalinhamentos no receptor, o enlace continuará funcionando.

As perdas ocasionadas por atenuação atmosférica, chuvas e turbulências variam de acordo com as condições adversas da atmosfera e do clima local, por isso, a análise das condições do ambiente em que se deseja instalar o enlace óptico no espaço livre se torna muito

importante. Medidas de visibilidade e precipitação precisam ser levantadas, para que as perdas possam ser previstas de forma adequada.

3.1.1 – Cenários Brasileiros

O Brasil é um país que possui uma área territorial extensa. Cada região do País apresenta características geográficas e climáticas diferentes. Não é possível analisar as características do ambiente de instalação, sem a análise da localidade específica. Estatísticas anuais de visibilidade e taxas de precipitações podem auxiliar o projetista na caracterização do meio em que será instalado o sistema, uma vez que esses dados mostram as condições esperadas de comportamento do meio. Considerando que serão trabalhados com os piores casos registrados no período, espera-se que o comportamento seja igual ou melhor ao que seja encontrado nos cálculos deste capítulo.

Neste contexto, considerando os cenários que algumas cidades brasileiras podem apresentar e a importância que eles possuem no cálculo de um balanço de potência, foram selecionadas seis cidades representativas das regiões brasileiras: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Na região Nordeste, foram selecionadas as cidade de Recife – PE e João Pessoa – PB, no Norte, a cidade de Manaus – AM, no Centro-Oeste, a cidade de Brasília – DF, no Sul, a cidade de Porto Alegre – RS e no Sudeste, a cidade de São Paulo – SP. Deste modo é apresentada uma análise mais próxima da situação real, para a instalação de enlaces ópticos no Brasil, tendo em vista que a literatura atual apresenta, em sua maioria, o cálculo apenas para uma única cidade, geralmente situada no Sudeste ou Norte do país.

Região Nordeste

Recife – PE

A cidade de Recife possui clima tropical, por estar localizada em zona de baixa latitude. Apresenta temperaturas médias mensais em torno de 25 °C. Nos meses de janeiro e fevereiro, considerados os mais quentes, apresenta em geral, temperaturas superiores a 26 °C. Em meses como julho e agosto ocorrem em média temperaturas iguais ou inferiores a 24 °C [33]. O período de maior quantidade de chuvas acumuladas diárias está situado entre as estações de outono e inverno [34].

Por meio de dados obtidos com o Instituto de Controle do Espaço Aéreo, foram realizadas análises das condições observadas no Aeroporto do Guararapes e localidades próximas, na cidade de Recife, que permitem prever condições esperadas para períodos posteriores aos analisados.

Com base na taxa de precipitação horária máxima, registrada em cada dia do ano ou seja, os piores casos registrados diariamente, foi obtida a frequência apresentada na Figura 3.1.

De acordo com a Figura 3.1, é possível observar que no período analisado (2010-2012) houve uma frequência elevada de taxas horárias máximas de precipitação inferiores a 2 mm/h e

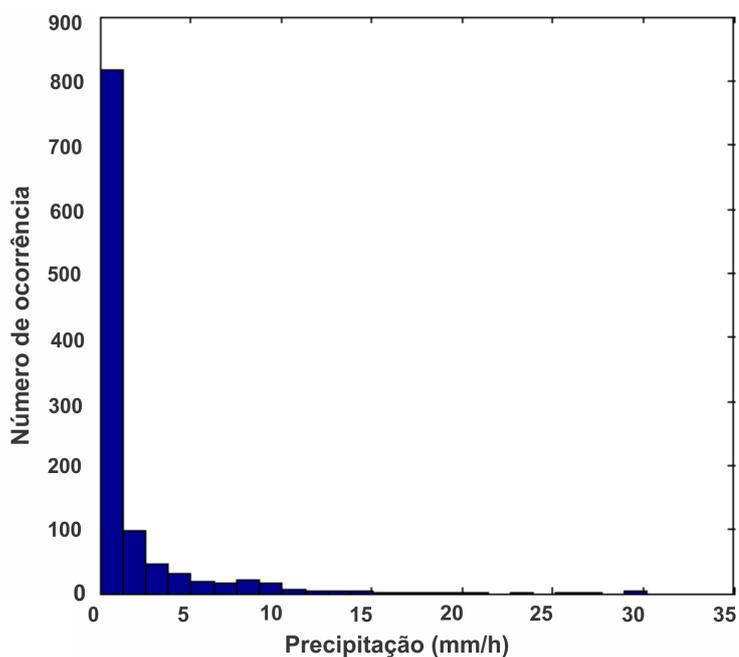


Figura 3.1 – Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto do Guararapes.

que a máxima taxa de precipitação registrada em uma hora do dia ao longo do período, foi de 30,2 mm/h.

A partir da análise realizada para os piores casos horários de precipitação registrados, é possível observar que as taxas de precipitação refletem em sua maioria, situações melhores que céu limpo, conforme apresentado no Quadro 2.1.

No que diz respeito à visibilidade, a partir dos dados referentes ao mesmo período analisado, é possível observar a frequência de ocorrência dos valores de visibilidade mínima registrados diariamente, conforme representado pela Figura 3.2.

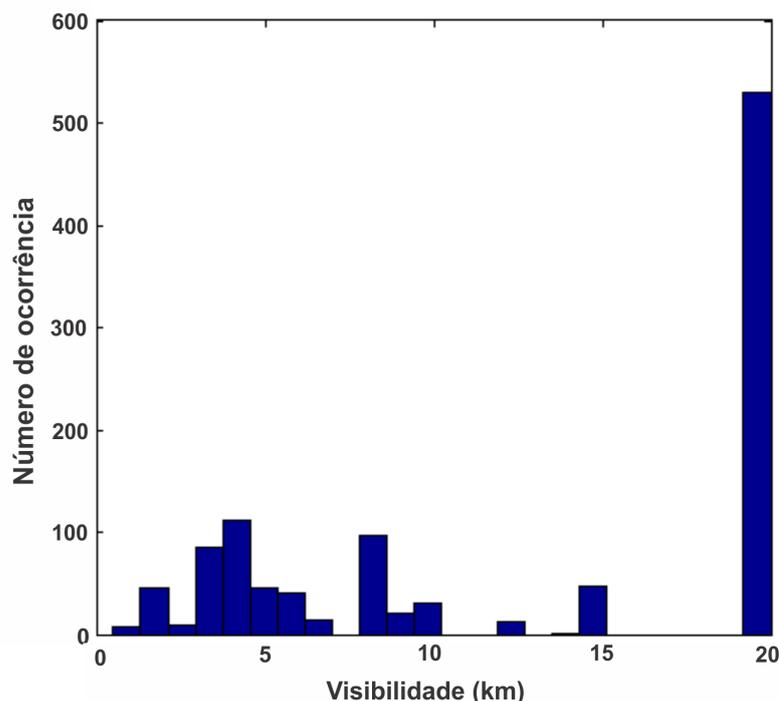


Figura 3.2 – Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto do Guararapes.

É possível observar que ao longo dos anos pesquisados, a maior frequência de visibilidade em uma taxa acima de 50 % de ocorrência, foi superior a céu limpo (>10 km) e a menor visibilidade foi superior a 0,49 km, com apenas uma ocorrência em uma hora do dia durante o período. Isto pode ser uma característica positiva para a instalação de enlaces FSO, vista a dependência da atenuação atmosférica as situações de baixa visibilidade.

João Pessoa – PB

João Pessoa está localizada no Estado de Paraíba, possui clima tropical úmido, com temperatura média anual de 25°C e alto índice pluviométrico acumulado, concentrado principalmente nos meses de maio a julho. No verão, a taxa de evaporação pode chegar a 160 mm [35]. Por meio dos dados de precipitação horária máxima e visibilidade mínima no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Castro Pinto em João Pessoa, foram obtidas as estatísticas de ocorrência apresentadas nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente.

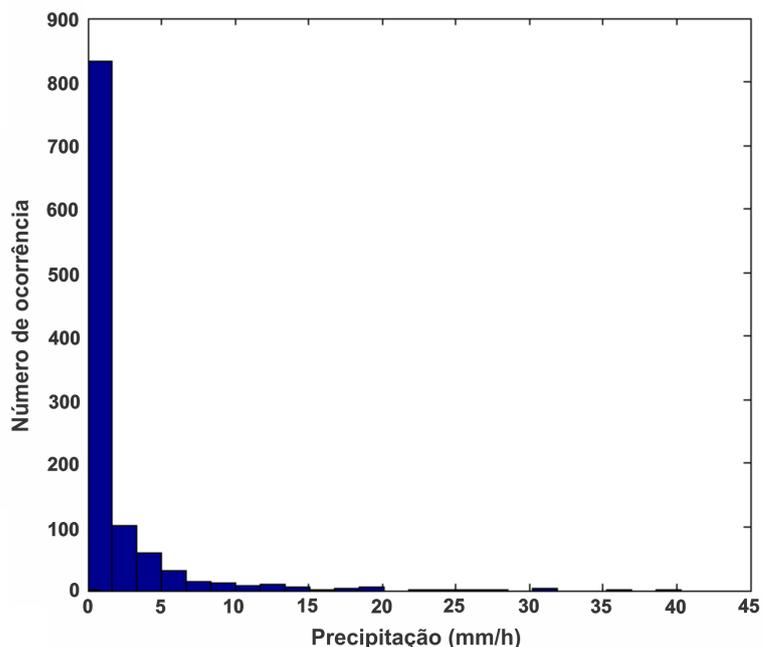


Figura 3.3 – Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Castro Pinto.

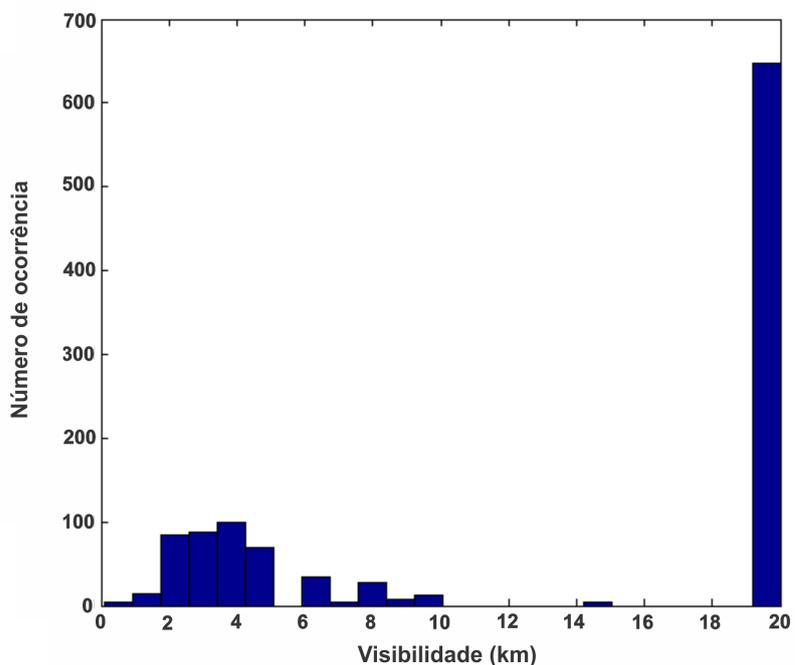


Figura 3.4 – Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Castro Pinto.

De acordo com os resultados, a maior ocorrência de precipitação horária máxima situou-se em valores inferiores ou iguais a 4 mm, situação semelhante à registrada na cidade Recife,

no mesmo período. A máxima precipitação horária foi de 36,2 mm, com apenas uma ocorrência registrada.

Por meio da Figura 3.4, é possível analisar que a maior frequência de visibilidade (maior do que 50 % dos registros), foi superior a 10 km, situação também semelhante à registrada em Recife.

As cidades apresentam características climáticas semelhantes, típicas da região Nordeste, com baixos registros de situações de neblina a nevoeiro.

Região Sul

Porto Alegre – RS

A cidade de Porto Alegre, localizada no sul do Brasil, possui clima subtropical úmido, com as quatro estações definidas no ano. É considerada uma das capitais com clima mais frio do País, apresenta frequência de ocorrência de nevoeiros elevada e temperatura média anual de 19,5°C. Nos meses de inverno (junho a setembro), as temperaturas podem variar entre 2°C e 20°C [36], [37]. Com base nas condições observadas para as taxas de precipitação máximas e visibilidades mínimas registradas nos anos de 2010 a 2012, no Aeroporto Salgado Filho, Porto Alegre - RS, são apresentadas as frequências de ocorrência nas Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente.

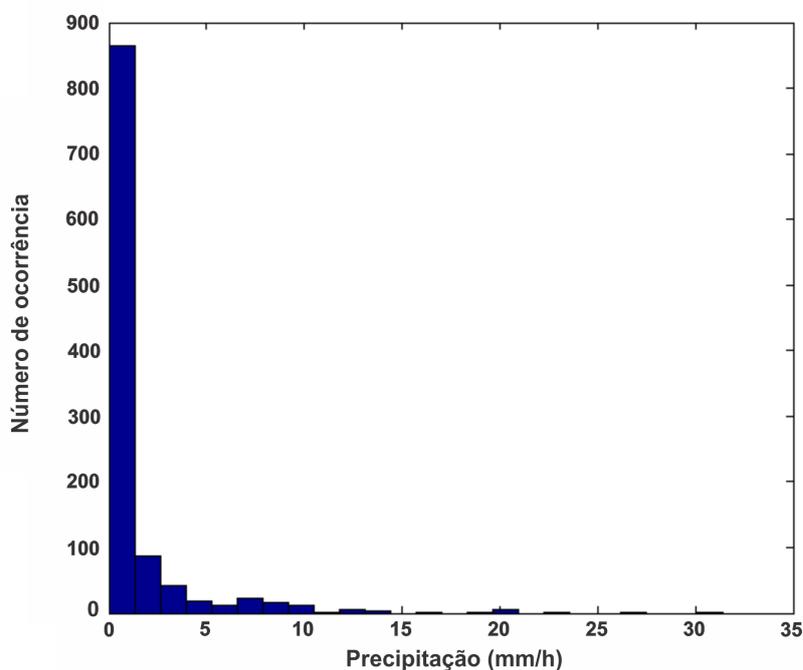


Figura 3.5 – Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Salgado Filho.

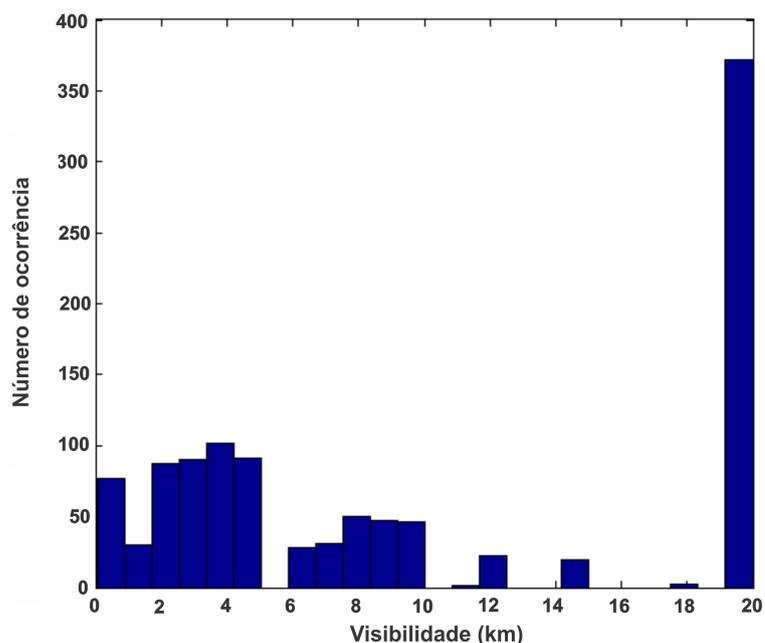


Figura 3.6 – Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Salgado Filho.

Por meio dos resultados, é possível observar que o maior número de ocorrência foi de taxa de precipitação inferior a 2 mm/h, alcançando um valor horário máximo no período analisado de 31,2 mm/h. Essas frequências foram semelhantes às obtidas para a cidade de Recife. No entanto, no que diz respeito à visibilidade a frequência predominante acima de 50 % dos registros, foi inferior a 10 km (céu limpo). As visibilidades inferiores a 4 km apresentam uma elevada frequência ao longo do período, que refletem as características climáticas que a cidade de Porto Alegre apresenta em relação à ocorrência de neblinas e nevoeiros.

Região Centro-Oeste

Brasília – DF

A cidade de Brasília está localizada na região Centro-Oeste do País, possui clima tropical de altitude, com temperatura média anual de 22 °C. Apresenta dois períodos característicos: seco, entre os meses de abril e setembro e úmido entre outubro e março. O mês considerado mais quente do ano é agosto e o mais frio, julho [38]. Por meio dos dados obtidos para o período que está sendo tomado como base (2010-2012), no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek, Brasília - DF, são representadas nas Figuras 3.7 e 3.8 as frequências de ocorrência dos piores casos de precipitação e visibilidade, respectivamente.

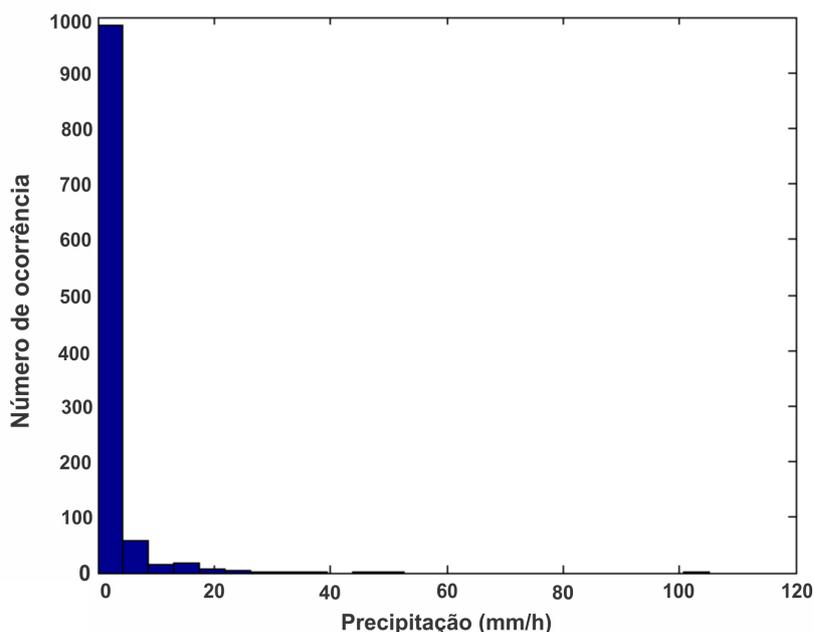


Figura 3.7 – Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek.

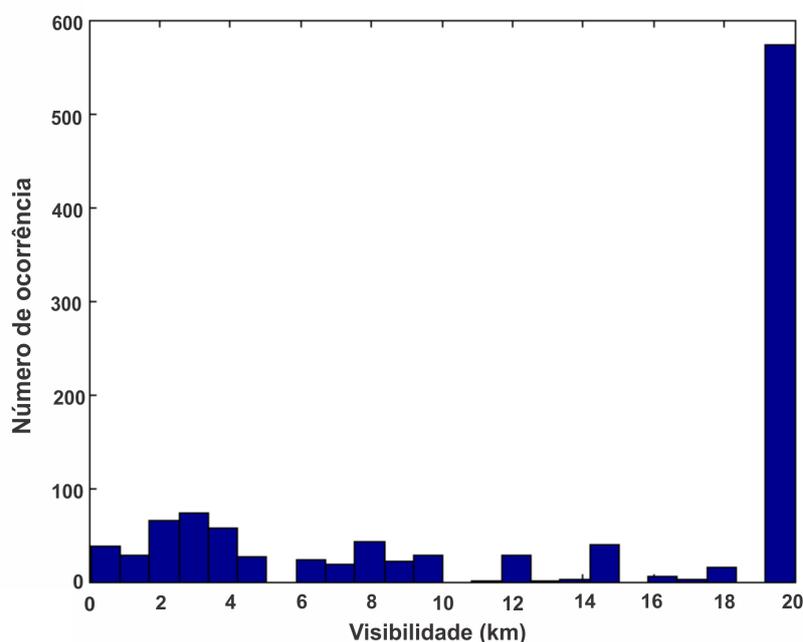


Figura 3.8 – Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek.

Por meio da análise estatística apresentada, é possível verificar, que a maior frequência de precipitação horária máxima situou-se em um valor inferior a 4 mm/h, valor semelhante ao apresentado na região Nordeste, no mesmo período. No entanto, com uma ocorrência maior. Além disso, foi registrado como pior caso de precipitação horária o valor de 105 mm/h. Isto se

deve à característica que a cidade apresenta em relação a chuvas regulares, que ocorrem durante o período úmido e chuvoso do ano (outubro a março). Com relação à visibilidade, a frequência foi bastante variada, apresentando maior ocorrência de valores superiores a 10 km.

Região Norte

Manaus – AM

A cidade de Manaus está localizada no Estado do Amazonas, no centro geográfico da Amazônia. Possui clima tropical quente e úmido, com temperatura média anual variando entre 23,3 °C e 31,4 °C e precipitação média anual de 2286 mm. Apresenta variação sazonal limitada aos períodos de chuva (dezembro a maio) e seco (junho a novembro) [39]. Com base nos dados do período de 2010 a 2012 no Aeroporto Eduardo Gomes, Manaus - AM, são representadas nas Figuras 3.9 e 3.10, a frequência de ocorrência em função da precipitação e visibilidade, respectivamente.

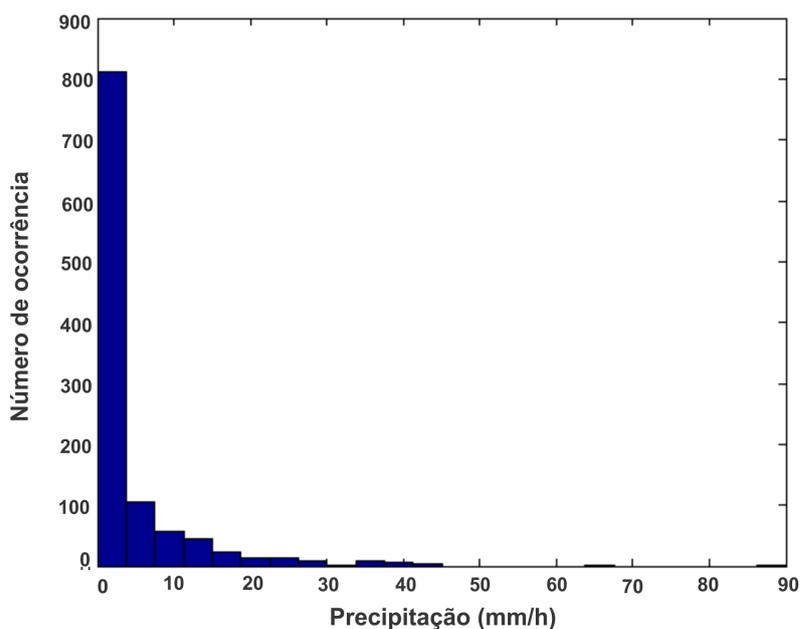


Figura 3.9 – Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Eduardo Gomes.

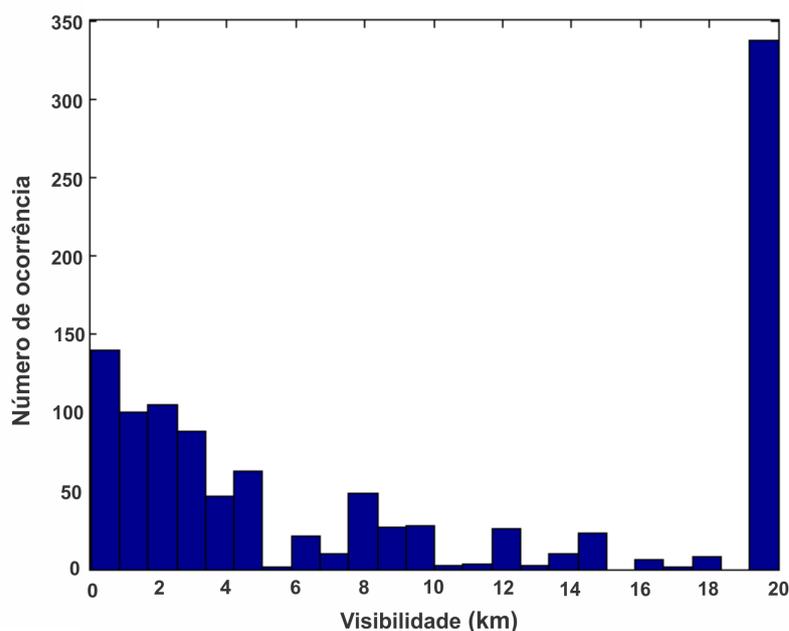


Figura 3.10 – Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto Eduardo Gomes.

Por meio dos resultados, é possível observar que houve uma maior frequência de ocorrência de precipitação para valores inferiores a 10 mm. A taxa de precipitação horária máxima, registrada no período, foi igual a 90 mm/h.

No que diz respeito à visibilidade, houve uma ocorrência elevada de situações de nevoeiro grosso a denso (<100 m), com um único registro de visibilidade igual a 50 m. Isto pode não ser uma característica positiva para a instalação de enlaces ópticos no espaço livre, porém vale ressaltar que estão sendo considerados os piores casos e que, com a utilização de fontes e receptores adequados, é possível obter um melhor desempenho.

Região Sudeste

São Paulo – SP

A cidade de São Paulo está situada no Estado de São Paulo, possui clima subtropical úmido, com verões chuvosos. A temperatura média no mês mais quente é superior a 22°C. A cidade é caracterizada pelas diferentes mudanças climáticas que podem ocorrer em um único dia [40]. Com base na análise estatística realizada no Aeroporto de Guarulhos, São Paulo - SP, para o período (2010-2012), a frequência de ocorrência de precipitação máxima e visibilidade mínima é representada por meio das Figuras 3.11 e 3.12, respectivamente.

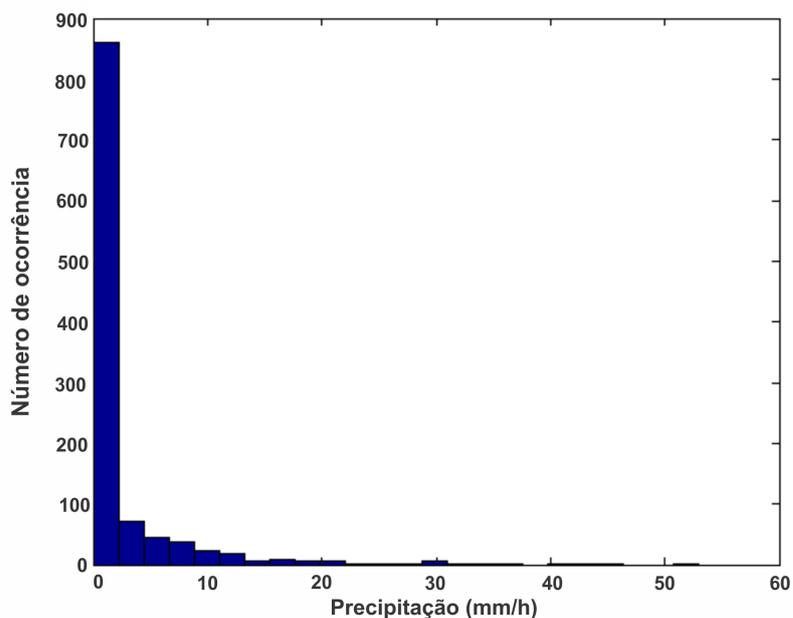


Figura 3.11 – Histograma da taxa de precipitação horária máxima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto de Guarulhos - SP.

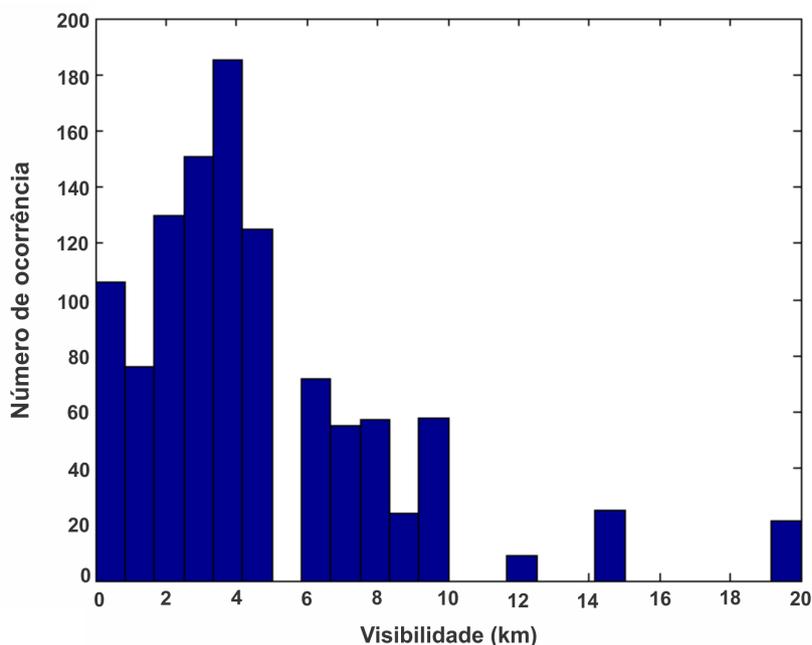


Figura 3.12 – Histograma da visibilidade mínima registrada diariamente, no período de 2010 a 2012, no Aeroporto de Guarulhos - SP.

De acordo com resultados apresentados na Figura 3.11, a maior frequência de precipitação horária foi inferior a 7 mm. A máxima taxa registrada no período foi de 53 mm.

Em relação à ocorrência de visibilidades mínimas inferiores a 4 km no Aeroporto de Guarulhos em São Paulo, foi registrada uma frequência muito superior às demais regiões do

País, se destacando inclusive em relação à localidade analisada na cidade de Porto Alegre. Isto indica que na maioria dos dias, durante o período analisado, houve a ocorrência de visibilidade mínima inferior a 4 km. Deste modo, é destacada a análise precisa que se torna necessária à implementação de um enlace óptico no espaço livre na localidade, tendo em vista a influência significativa das perdas em função da baixa visibilidade no desempenho de um sistema FSO, conforme discutido no Capítulo 2.

3.2 – Resultados e Simulações para as Cidade de Recife – PE, João Pessoa – PB, Porto Alegre – RS, Brasília – DF, Manaus – AM e São Paulo – SP em 2012

Atenuação Atmosférica

As características da atenuação atmosférica foram discutidas no Capítulo 2. Nesta seção são analisados os efeitos a partir da Lei de Lambert-Beer, conforme a Fórmula 2.2, considerando apenas o espalhamento Mie, que corresponde a um dos efeitos de maior influência nos enlaces ópticos no espaço livre.

A partir da análise estatística realizada para os anos de 2010 a 2012, foram selecionados os valores de visibilidade no ano de 2012. E com esses dados foram geradas funções cumulativas de probabilidade de visibilidade e selecionado o registro a partir do qual a visibilidade é maior ou igual em 90% do tempo analisado¹. Além disso, foram selecionados os piores registros de visibilidade em meses representativos dos climas de verão e inverno, para todas as cidades analisadas, de modo que se tenha uma análise das condições distintas do ano, para os comprimentos de onda de 1550 nm, 850 nm e 785 nm.

Região Nordeste: Recife – PE e João Pessoa – PB

Tabela 3.1 – Visibilidades mínimas em Recife - PE.

Período	Visibilidade (m)
Janeiro/2012	2500
Junho/2012	1200
Maior ocorrência em 2012	≥ 4000

¹As funções cumulativas de probabilidade de visibilidade mínima diária para todas as cidades em 2012 são apresentadas no ANEXO A.

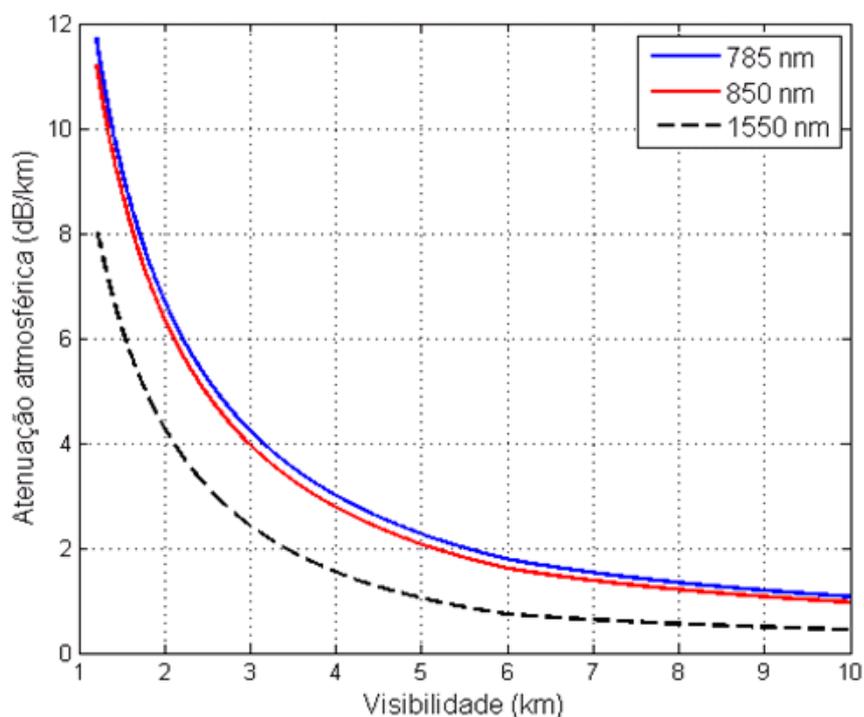


Figura 3.13 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade, no Aeroporto dos Guararapes em 2012.

De acordo com a Figura 3.13, é possível observar que os valores máximos de perdas são de aproximadamente 12 dB/km, para o comprimento de onda de 785 nm. O comprimento de onda de 1550 nm, apresentou os melhores resultados, com valores de atenuação máximos iguais a 8 dB/km, para a visibilidade mínima registrada em 2012, 1200 m no mês de junho. No entanto, para a visibilidade mínima de maior ocorrência diária nesse mesmo ano (≥ 4 km), a atenuação foi inferior a 2 dB/km, nesse mesmo comprimento de onda.

Tabela 3.2 – Visibilidades mínimas em João Pessoa – PB.

Período	Visibilidade (m)
Janeiro/2012	2000
Junho/2012	2000
Maior ocorrência em 2012	≥ 3000

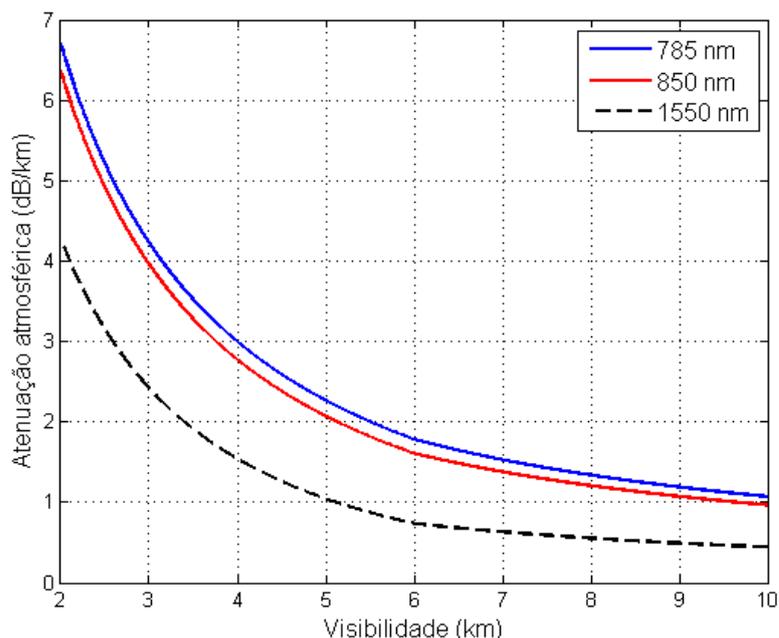


Figura 3.14 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Castro Pinto.

De acordo com a Figura 3.14, é possível observar que o maior valor das perdas por espalhamento Mie, a partir do pior caso registrado no ano de 2012 e que também foi o pior registro dos meses de verão e inverno (2000 m), foi inferior a 7 dB/km, no comprimento de onda de 785 nm. No entanto, para o comprimento de onda de 1550 nm, que apresentou os melhores resultados, as perdas seriam, no máximo, de 4 dB/km e, para a visibilidade mínima de maior frequência em 2012, as perdas seriam inferiores a 3 dB/km, no mesmo comprimento de onda.

Região Sul: Porto Alegre - RS

Tabela 3.3 – Visibilidades mínimas em Porto Alegre – RS.

Período	Visibilidade (m)
Janeiro/2012	500
Junho/2012	100
Maior ocorrência em 2012	≥ 1000

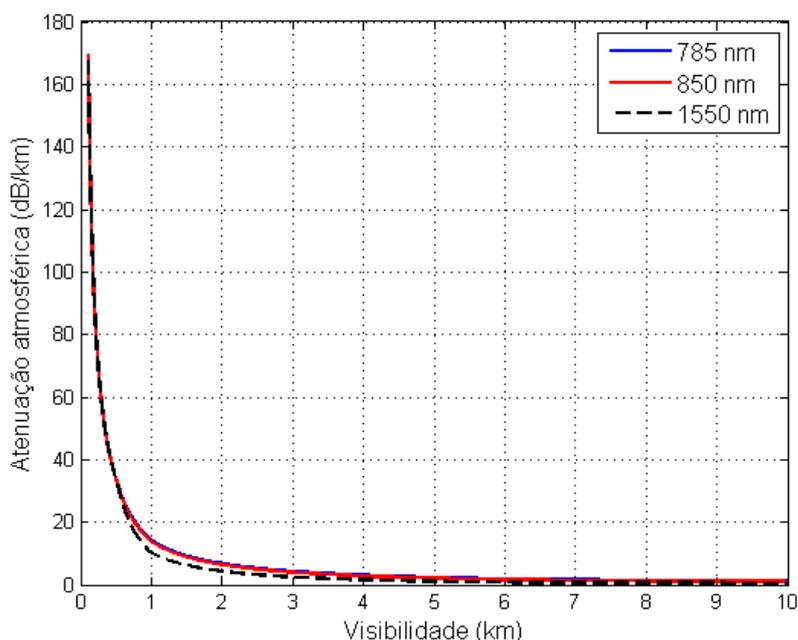


Figura 3.15 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Salgado Filho.

Observando os resultados apresentados na Figura 3.15, é possível verificar que, para visibilidades inferiores a 500 m, o espalhamento se torna não seletivo em comprimento de onda, conforme analisado pelo modelo de Kim [13]. Logo, independente do comprimento de onda utilizado, os valores de perda foram os mesmos. Foi registrado um valor máximo de 170 dB/km, para a visibilidade mínima no mês de junho, que também foi o menor registro do ano: 100 m.

Para a visibilidade mínima registrada no mês de verão (janeiro), 600 m, é verificada perda de aproximadamente 35 dB/km, no comprimento de onda de 1550 nm. Para os valores de visibilidades com maior frequência de ocorrência (≥ 3000 m), as perdas foram inferiores a 14 dB/km.

Região Centro-Oeste: Brasília – DF

Tabela 3.4 – Visibilidades mínimas em Brasília – DF.

Período	Visibilidade (m)
Janeiro/2012	600
Junho/2012	50
Maior ocorrência em 2012	≥ 3000

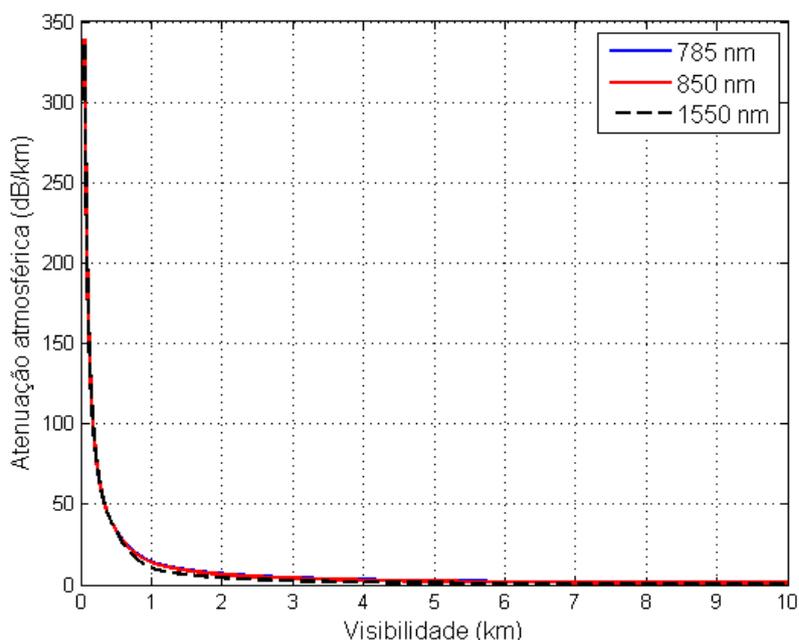


Figura 3.16 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Presidente Juscelino Kubitschek.

Da Figura 3.16, é possível perceber que para a visibilidade mínima, registrada no mês de junho (50 m), a perda alcançou um valor de aproximadamente 350 dB/km, valor elevado e que pode influenciar bastante o balanço de potência de um enlace. Para a visibilidade mínima registrada em janeiro (600 m), a perda foi de aproximadamente 30 dB/km. Porém, para a visibilidade mínima, a partir da qual houve a maior frequência de ocorrência no período (3000 m), as perdas foram inferiores a 4 dB/km.

Região Norte: Manaus – AM

Tabela 3.5 – Visibilidades mínimas em Manaus – AM.

Período	Visibilidade (m)
Janeiro/2012	500
Junho/2012	100
Maior ocorrência em 2012	≥ 600

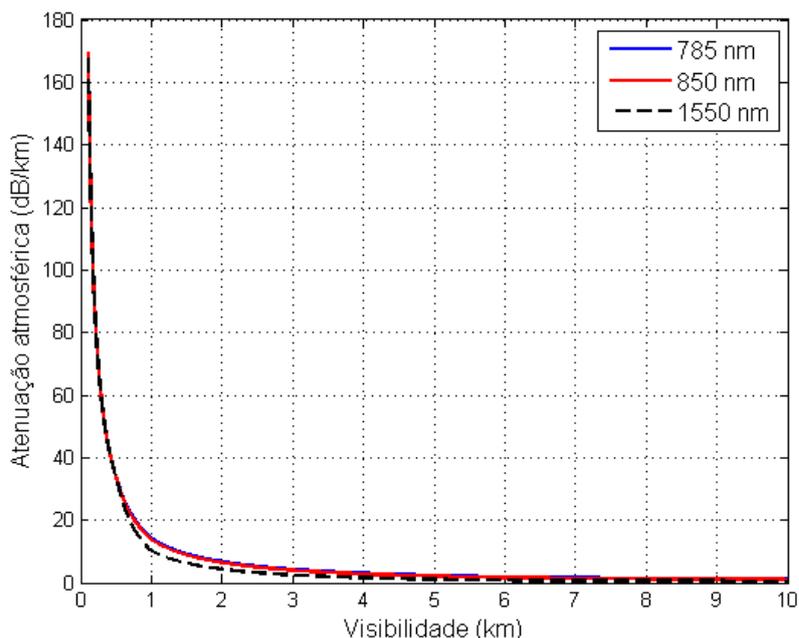


Figura 3.17 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Eduardo Gomes.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.17, é possível verificar que o maior valor de atenuação foi de 170 dB/km, para a visibilidade mínima registrada no mês de junho/2012. Na visibilidade mínima registrada no mês de janeiro, a perda foi de 35 dB/km. Para as visibilidades de maior ocorrência em 2012, os valores de atenuação estão situados 27 dB/km.

Região Sudeste: São Paulo

Tabela 3.6 – Visibilidades mínimas em São Paulo – SP.

Período	Visibilidade (m)
Janeiro/2012	500
Junho/2012	100
Maior ocorrência em 2012	≥ 600

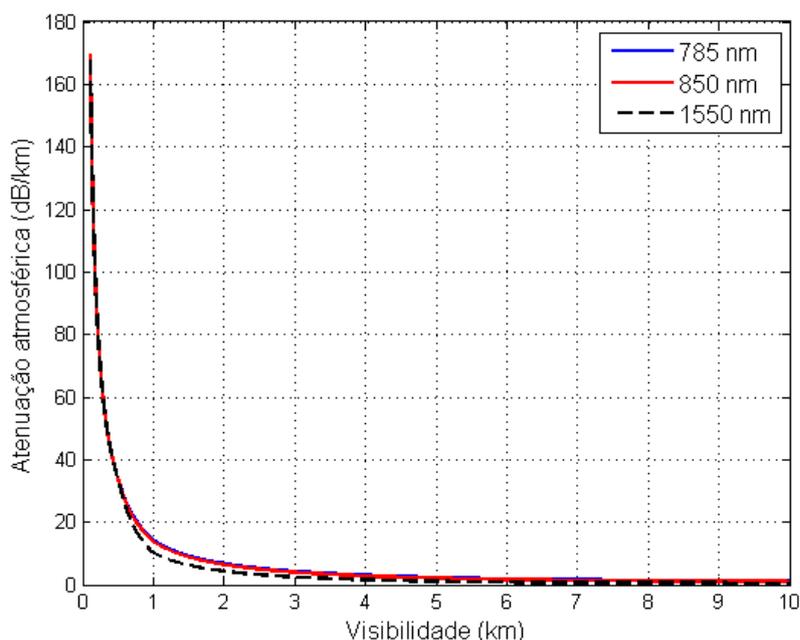


Figura 3.18 – Atenuação atmosférica em função da visibilidade em 2012, no Aeroporto Internacional de Guarulhos.

Da Figura 3.18 é possível observar que para a visibilidade registrada no mês de junho, a atenuação atingiu um valor máximo de 170 dB/km. Já para visibilidade mínima em janeiro, a perda foi de 35 dB/km. Os mesmos resultados foram observados em Manaus, tendo em vista que foram registrados os mesmos valores de visibilidade mínima nos períodos analisados.

Atenuação por Chuvas

A atenuação ocasionada por chuvas pode seguir a variação de Carbonneau, conforme discutido no Capítulo 2, que é função da taxa de precipitação horária, em milímetros. Devido à relação direta que há entre a precipitação e a atenuação, quanto maior o valor de precipitação, maior será a atenuação.

Considerando as características apresentadas nos Aeroportos, em 2012, foram selecionados meses representativos de verão e inverno, em que houve o registro de maior taxa de precipitação horária. E assim como foi realizado com os dados de visibilidade, foram geradas funções cumulativas de probabilidade de precipitação e selecionados os registros que ocorreram em 99 % do tempo analisado ². Com base nas taxas de precipitações, foi possível obter a atenuação em função da precipitação.

²As funções cumulativas de probabilidade de precipitação máxima diária são apresentadas no ANEXO A.

Região Nordeste: Recife – PE e João Pessoa – PB

Tabela 3.7 – Precipitações máximas em Recife – PE.

Período	Precipitação (mm/h)
Janeiro/2012	15,2
Julho/2012	10,1
Maior ocorrência em 2012	$\leq 10,1$

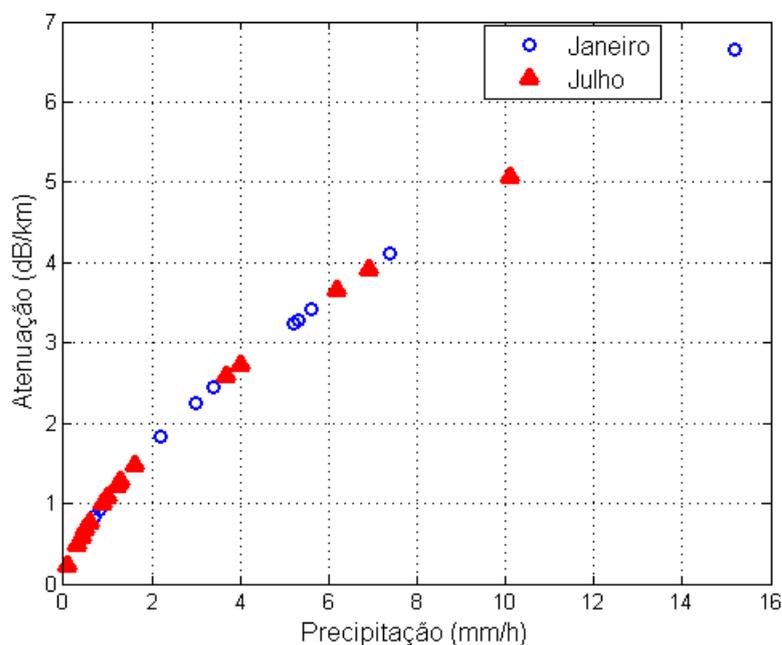


Figura 3.19 – Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas em 2012, no Aeroporto dos Guararapes.

A partir dos resultados, é possível observar que o maior valor de atenuação no ano de 2012 é inferior a 7 dB/km, registrado no mês de janeiro. Apesar da frequência de chuvas na região, os valores de atenuação foram baixos, tendo em vista que as perdas estão relacionadas à precipitação acumulada por hora em milímetros.

Tabela 3.8 – Precipitações máximas em João Pessoa – PB.

Período	Precipitação (mm/h)
Janeiro/2012	36,2
Junho/2012	30,7
Maior ocorrência em 2012	$\leq 17,4$

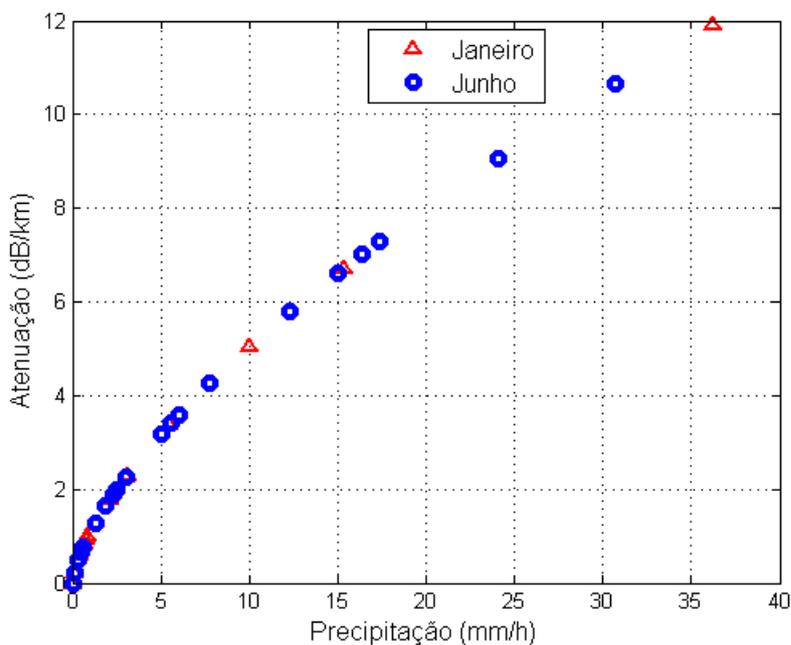


Figura 3.20 – Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas em 2012, no Aeroporto Castro Pinto.

Na Figura 3.20, a atenuação atinge um valor máximo de 12 dB/km, referente às taxas de precipitação horária máxima do mês de janeiro/2012. Em junho a perda máxima foi de aproximadamente 10,5 dB/km. Os resultados foram piores do que os apresentados em Recife – PE, devido à ocorrência de valores de taxas de precipitação horária maiores em João Pessoa – PB, conforme mostrado na Figura 3.3.

Região Sul: Porto Alegre – RS

Tabela 3.9 – Precipitações máximas em Porto Alegre – RS.

Período	Precipitação (mm/h)
Janeiro/2012	31,4
Setembro/2012	26,9
Maior ocorrência em 2012	≤ 22,4

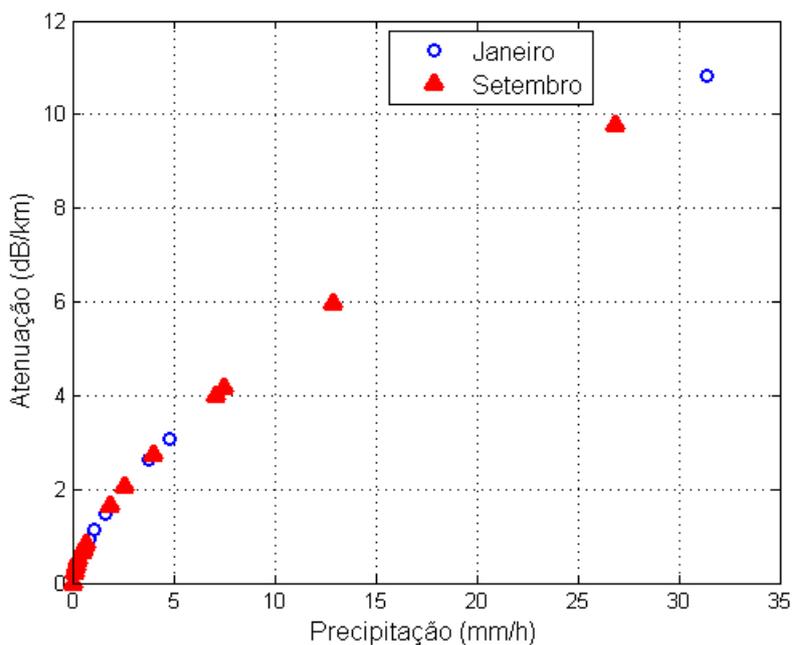


Figura 3.21 – Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Salgado Filho em 2012.

Por meio da Figura 3.21, é possível observar que a atenuação máxima no período foi de 11 dB/km, de acordo com a precipitação horária máxima em janeiro/2012, que também correspondeu à maior taxa de precipitação do ano.

Região Centro-Oeste: Brasília – DF

Tabela 3.10 – Precipitações máximas em Brasília – DF.

Período	Precipitação (mm/h)
Março/2012	36
Outubro/2012	105
Maior ocorrência em 2012	≤ 15,5

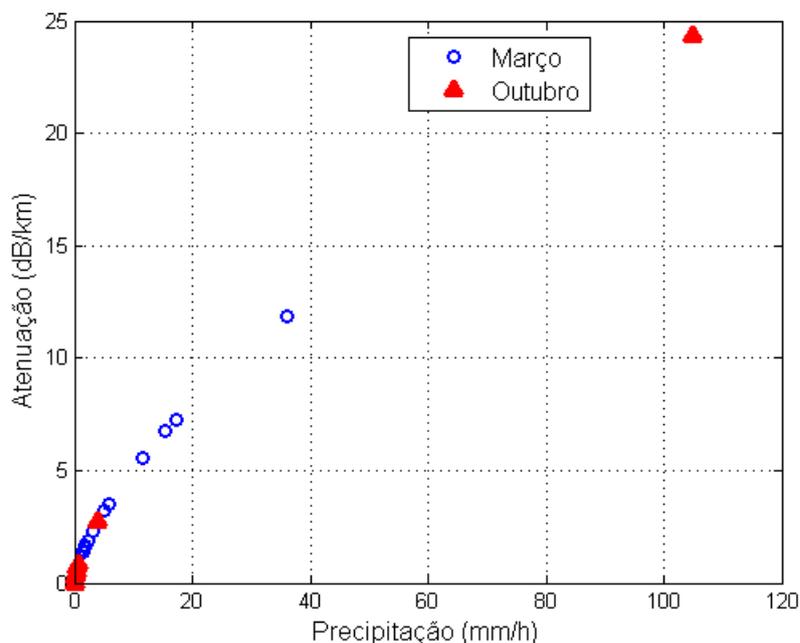


Figura 3.22 – Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Juscelino Kubitschek em 2012.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.22, é possível verificar que a atenuação máxima no período foi de 24 dB/km, para a taxa de precipitação horária máxima no mês de inverno. Apesar de ser considerado um período seco na região, registrou taxa de 105 mm/h, que também foi a maior taxa registrada no ano de 2012. No mês de março, que apresentou a maior taxa de precipitação de verão, em 2012, a atenuação máxima foi de 12 dB/km. Considerando a maior ocorrência de precipitação horária máxima no ano, as perdas se situaram em um valor menor do que 5 dB/km.

Região Norte: Manaus – AM

Tabela 3.11 – Precipitações máximas em Manaus – AM.

Período	Precipitação (mm/h)
Abril/2012	90
Julho/2012	22,3
Maior ocorrência em 2012	≤ 31,6

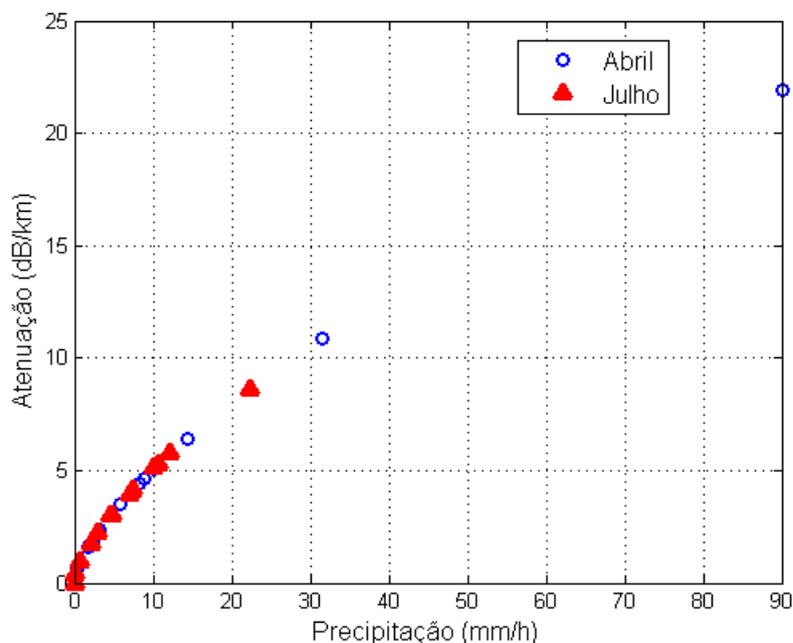


Figura 3.23 – Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Eduardo Gomes, em 2012.

A partir dos resultados, é possível observar que o maior valor de atenuação foi registrado em 23 dB/km, devido à taxa de precipitação horária máxima registrada no período chuvoso do ano, que também correspondeu à máxima do ano. No período seco, representado pelo mês de julho, a atenuação máxima foi de 8 dB/km.

Região Sudeste: São Paulo – SP

Tabela 3.12 – Precipitações máximas em São Paulo – SP.

Período	Precipitação (mm/h)
Dezembro/2012	31,1
Junho/2012	19,9
Maior ocorrência em 2012	≤ 29,8

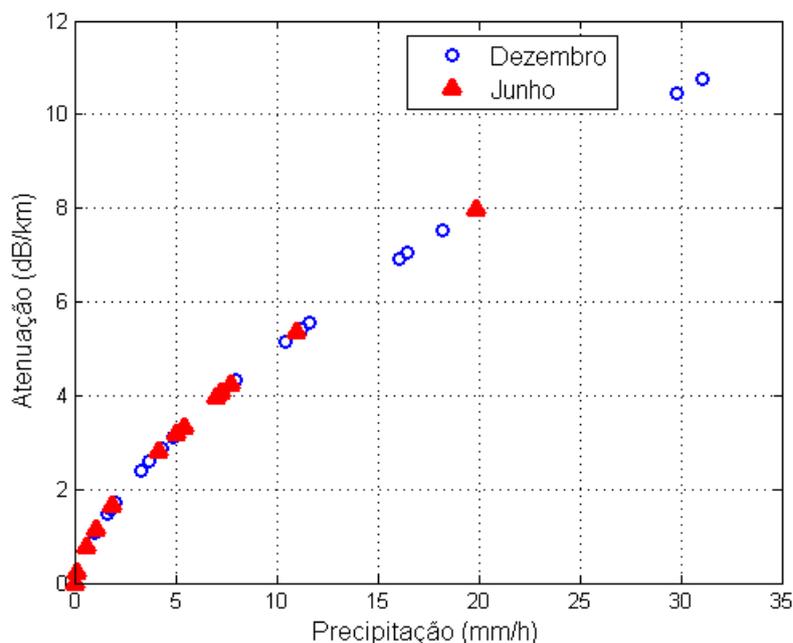


Figura 3.24 – Atenuação atmosférica ocasionada por chuvas, no Aeroporto Internacional de Guarulhos, em 2012.

De acordo com a Figura 3.24, é possível verificar que a atenuação máxima obtida na análise, foi superior a 10 dB/km, relacionada à precipitação horária máxima registrada no mês de dezembro, que também foi a máxima do ano. No mês de junho, a perda máxima foi de 8 dB/km, considerado um dos meses mais frios e de menor ocorrência de chuvas na região.

Atenuação Geométrica

Conforme analisado no Capítulo 2, devido à difração, o feixe de luz transmitido é espalhado na propagação, resultando na detecção de apenas uma fração do feixe na abertura do receptor. Isto é influenciado principalmente pelas áreas de superfície do transmissor e receptor, pelo ângulo de divergência do feixe e pela distância do enlace. Na Figura 3.25, é apresentada a variação dos valores de atenuação, para diferentes ângulos de divergência, considerando as áreas de superfície das lentes de transmissão e recepção iguais a $0,0023 \text{ m}^2$.

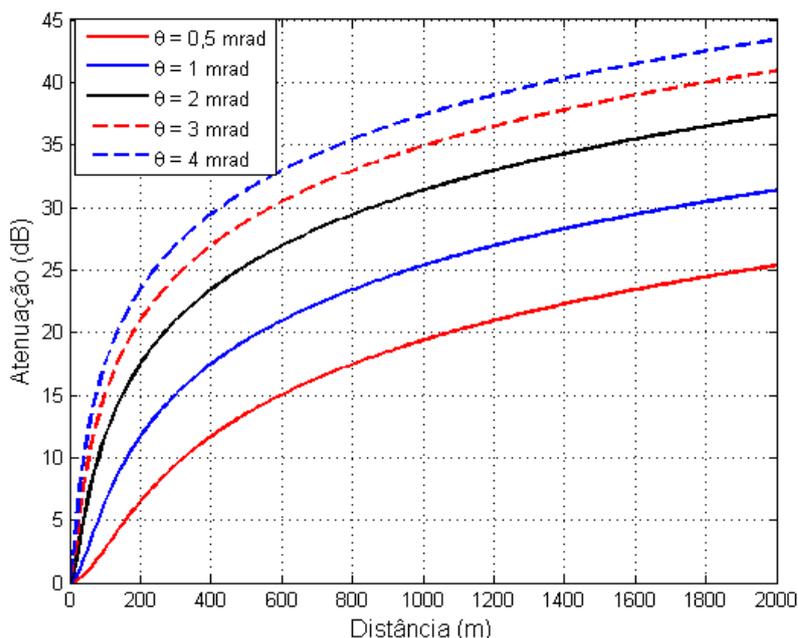


Figura 3.25 – Atenuação geométrica para diferentes ângulos de divergência.

De acordo com os resultados, com o aumento da divergência do feixe, a atenuação também aumenta devido à maior área que será ocupada pelo feixe no receptor, reduzindo o percentual de potência que é captado. É possível observar ainda que a diferença de apenas 0,5 mrad pode provocar um aumento de atenuação de aproximadamente 6 dB. Isso destaca a importância do ângulo de divergência, em um projeto para enlaces ópticos no espaço livre.

É importante ressaltar que a diminuição significativa do ângulo de divergência torna o feixe mais diretivo, com uma menor seção reta. Isto aumenta a dificuldade de alinhamento e vibrações nas estruturas poderiam tornar o enlace indisponível. Outra forma de diminuir as perdas ocasionadas pela atenuação geométrica é o aumento do tamanho das lentes receptoras.

Na Figura 3.26 é apresentada a atenuação para a área de superfície da lente transmissora fixa em $0,0023 \text{ m}^2$, ângulo de divergência igual a 1 mrad, em diferentes valores de áreas de superfície da lente receptora, que são encontrados em folhas de especificações [16] de fabricantes de transceptores FSO.

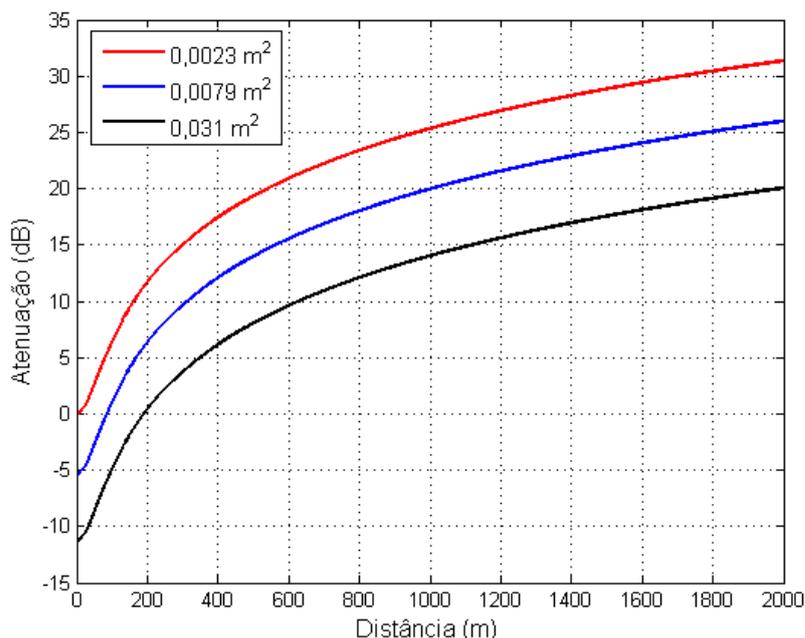


Figura 3.26 – Atenuação geométrica para lentes de diferentes dimensões.

Com o aumento da lente do receptor, as perdas resultantes da atenuação geométrica foram menores, mas é importante destacar que apesar da lente maior captar um percentual maior da potência do sinal, isso também a torna mais sujeita a captação da energia do espectro solar, que ocasiona um aumento do ruído de fundo do receptor, diminuindo a relação sinal ruído.

Atenuação por Cintilação e Deslocamento Aleatório do Feixe

Conforme discutido no Capítulo 2, o efeito de cintilação, ocasionado pela turbulência é o que mais se destaca nos enlaces ópticos no espaço livre. A variância de Rytov regula a atenuação ocasionada pelo efeito e um dos dados mais importantes é o parâmetro estrutural do índice de refração (C_n^2).

De acordo com a literatura, em enlaces horizontais, o parâmetro estrutural do índice de refração é comumente considerado constante, variando entre os valores de $10^{-12} m^{-2/3}$, para turbulência forte, $10^{-15} m^{-2/3}$, para turbulência média, e $10^{-17} m^{-2/3}$, para turbulência fraca [14]. Para a análise representada na Figura 3.27, é considerada a variação dos valores de atenuação para os diferentes comprimentos de onda, considerando o parâmetro de flutuação do índice de refração em situação de turbulência forte e média.

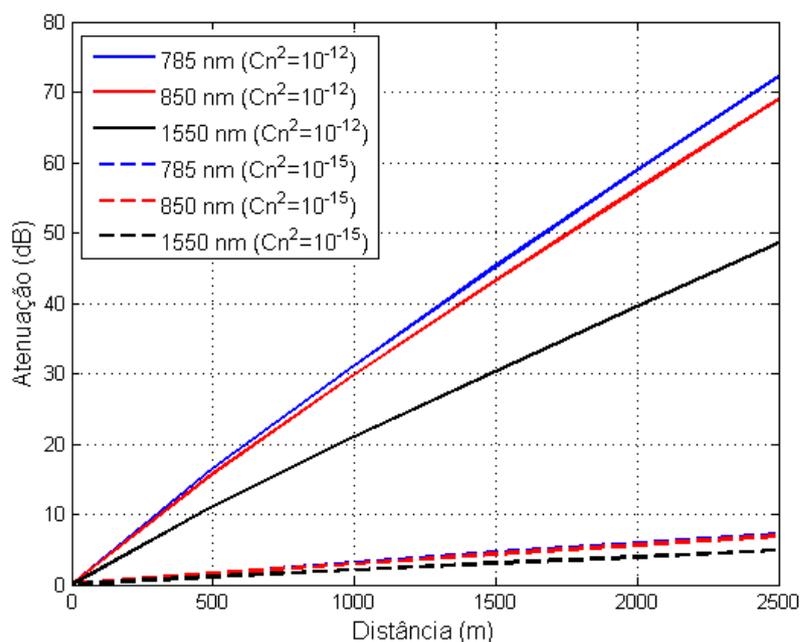


Figura 3.27 – Atenuação ocasionada por cintilação, em turbulências forte e média, em diferentes comprimentos de onda.

Em situações de turbulências forte e média, o desempenho do comprimento de onda de 1550 nm foi o maior, seguido dos comprimentos de onda de 850 nm e 785 nm.

Apesar da maior influência no enlace do efeito de cintilação, tendo em vista a previsão do maior número de efeitos ocasionados ao enlace óptico no espaço livre, as perdas por deslocamento aleatório do feixe devem ser consideradas no balanço de potência. Na Figura 3.28 é apresentada a variação da atenuação ocasionada por deslocamento aleatório do feixe, para os diferentes comprimentos de onda, considerando o parâmetro de flutuação do índice de refração em situação de turbulência forte e média.

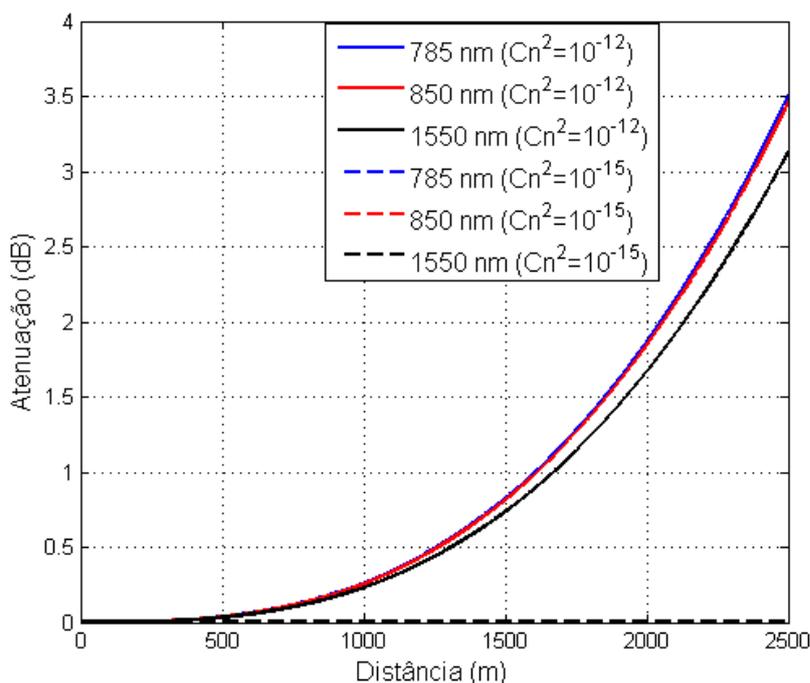


Figura 3.28 – Atenuação ocasionada por deslocamento aleatório do feixe, em turbulências forte e média, em diferentes comprimentos de onda.

Da Figura 3.28 é visto que as perdas ocasionadas por deslocamento aleatório do feixe em situação de turbulência média é baixa e próxima a zero. Em situação de turbulência forte os valores são bem maiores, mas relativamente menores em comparação aos valores de perdas ocasionadas por cintilação. No entanto, buscando prever o maior número de efeitos possíveis no FSO, se torna importante levar em consideração a influência desse efeito.

3.3 – Balanço de Potência para Enlaces FSO nas Cidades de Recife – PE, João Pessoa – PB, Porto Alegre – RS, Brasília – DF, Manaus – AM e São Paulo – SP

Por meio da análise estatística realizada para as condições climáticas observadas nas cidades representativas das cinco regiões brasileiras, apresentada nas seções anteriores, foi possível observar as diferentes características atmosféricas e climáticas que as cidades brasileiras apresentam. Desta forma, foi validada a análise em separado dos principais efeitos atmosféricos presentes em um enlace óptico no espaço livre.

No entanto, considerando que uma análise criteriosa do enlace que se pretende instalar em um determinado local, precisa levar em consideração a ocorrência dos efeitos de forma simultânea, de modo a se obter uma previsão mais aproximada da situação real, esta seção apresenta valores de balanços de potência para as cidades brasileiras de Recife – PE, João

Pessoa – PB, Brasília – DF, Manaus – AM, São Paulo – SP e Porto Alegre – RS, considerando os principais efeitos atmosféricos ao enlace óptico no espaço livre atuando simultaneamente.

Considerando as diferentes características atmosféricas apresentadas pelas cidades e buscando obter resultados a partir dos dados de dispositivos que estão disponíveis comercialmente, são selecionados dois modelos de transceptores para cálculo do balanço de potência nessa seção: um enlace de 155 *Mbits/s*, Fotodiodo PIN, fonte luminosa VCSEL, sensibilidade do receptor igual a -36 dBm, potência de transmissão de 14 dBm (Modelo 1). E um modelo de enlace com capacidade de 155 *Mbits/s*, fotodetector APD, sensibilidade do receptor igual a -46 dBm e potência de transmissão igual a 19 dBm (Modelo 2), ambos modelos *TereScope* [41]. Esses dados serão utilizados tomando como referência um enlace hipotético com alcance máximo de 2 km.

Região Nordeste

Tabela 3.13 – Dados para o balanço de potência realizado em Recife – PE.

P_{tx} (Modelo 1)	14 dBm
P_{tx} (Modelo 2)	19 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 1)	-36 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 2)	-46 dBm
S_T e S_R	0,0023 m^2
C_n^2	10^{-15}
Ângulo de divergência	2 mrad
Comprimento de onda central	850 nm
Visibilidade	4000 m
Precipitação	10,1 mm
Margem de segurança	5 dB

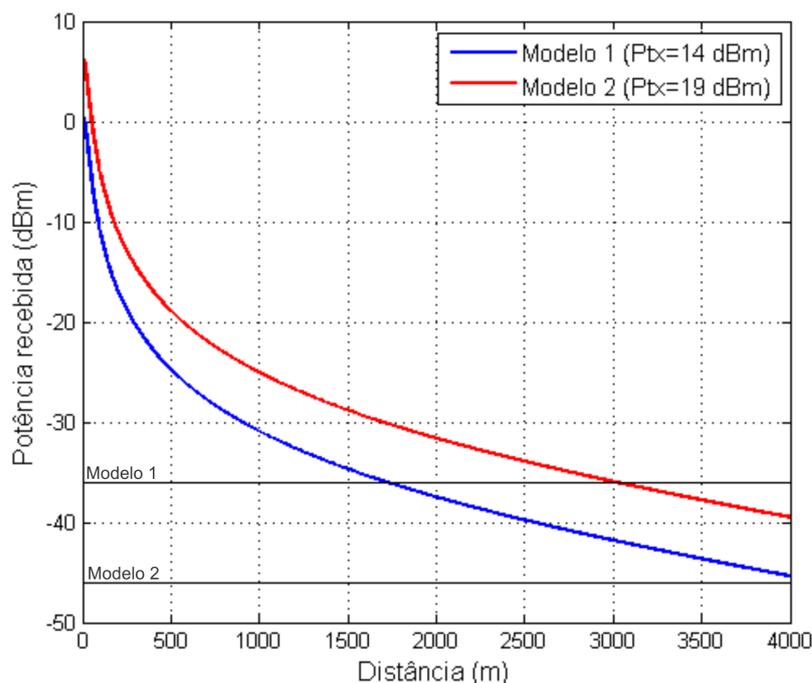


Figura 3.29 – Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Guararapes.

De acordo com os dados considerados é visto que utilizando o Modelo 1, com base nas condições locais, o alcance máximo seria de aproximadamente 1,8 km, inferior ao alcance proposto neste estudo que seria um enlace de 2 km. O Modelo 2 alcançaria distâncias superiores a 4 km, nesse contexto seria adequado à aplicação desejada.

Tabela 3.14 – Dados para o balanço de potência realizado em João Pessoa – PB.

P_{tx} (Modelo 1)	14 dBm
P_{tx} (Modelo 2)	19 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 1)	-36 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 2)	-46 dBm
S_T e S_R	0,0023 m ²
C_n^2	10 ⁻¹⁵
Ângulo de divergência	2 mrad
Comprimento de onda central	850 nm
Visibilidade	3000 m
Precipitação	17,4 mm
Margem de segurança	5 dB

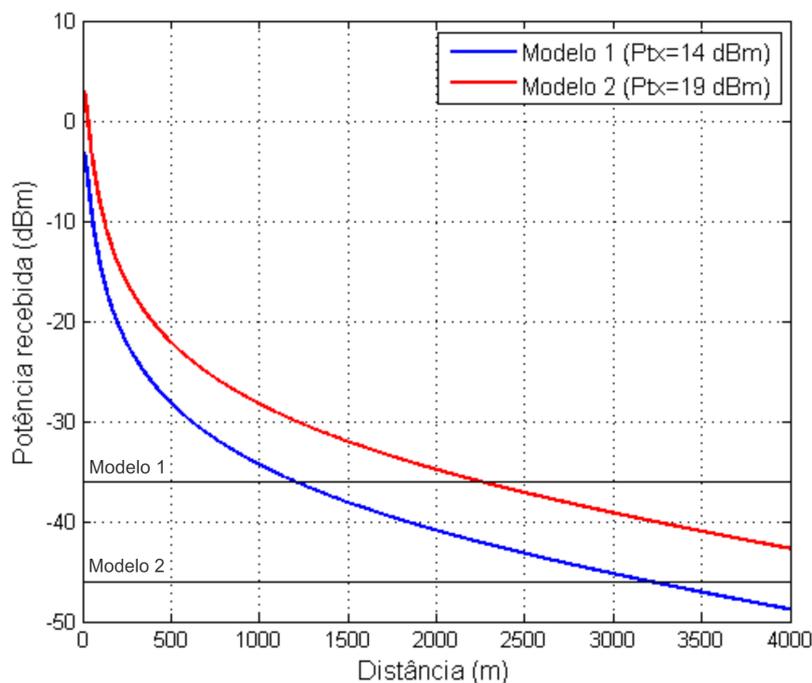


Figura 3.30 – Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Castro Pinto.

De acordo com a Figura 3.30, o alcance do enlace para as condições locais analisadas seria de aproximadamente 1,46 km com base nas informações do Modelo 1. O que representa um alcance menor do que o apresentado em Recife, isso deve-se à maior taxa de precipitação e menor visibilidade utilizada nos cálculos, em João Pessoa. Para o Modelo 2, o alcance do enlace seria superior a 4 km.

Região Centro-Oeste

Tabela 3.15 – Dados para o balanço de potência realizado em Brasília – DF.

P_{tx} (Modelo 1)	14 dBm
P_{tx} (Modelo 2)	19 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 1)	-36 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 2)	-46 dBm
S_T e S_R	0,0023 m ²
C_n^2	10 ⁻¹⁵
Ângulo de divergência	2 mrad
Comprimento de onda central	850 nm
Visibilidade	3000 m
Precipitação	15,5 mm
Margem de segurança	5 dB

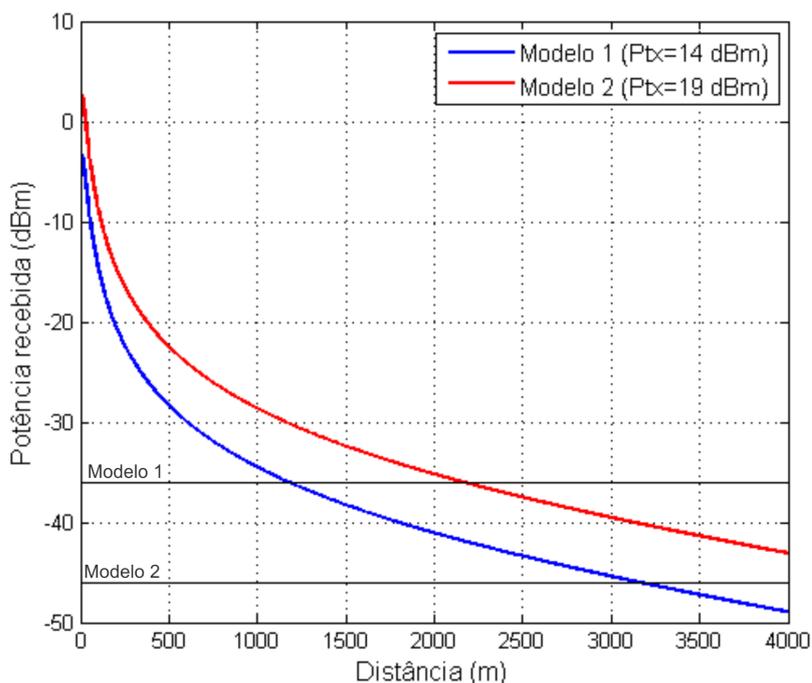


Figura 3.31 – Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Juscelino Kubitschek.

De acordo com a Figura 3.31, para o Modelo 1 o alcance do enlace se situaria em um valor de aproximadamente 1,1 km. A partir das informações do Modelo 2, o alcance seria superior a 4 km, de modo semelhante as cidades do Nordeste. Nesse contexto, o Modelo 2 seria mais adequado à aplicação proposta, com base nos dados do balanço.

Região Norte

Tabela 3.16 – Dados para o balanço de potência realizado em Manaus – AM.

P_{tx} (Modelo 1)	14 dBm
P_{tx} (Modelo 2)	19 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 1)	-36 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 2)	-46 dBm
S_T e S_R	0,0023 m ²
C_n^2	10 ⁻¹⁵
Ângulo de divergência	2 mrad
Comprimento de onda central	850 nm
Visibilidade	600 m
Precipitação	31,6 mm
Margem de segurança	5 dB

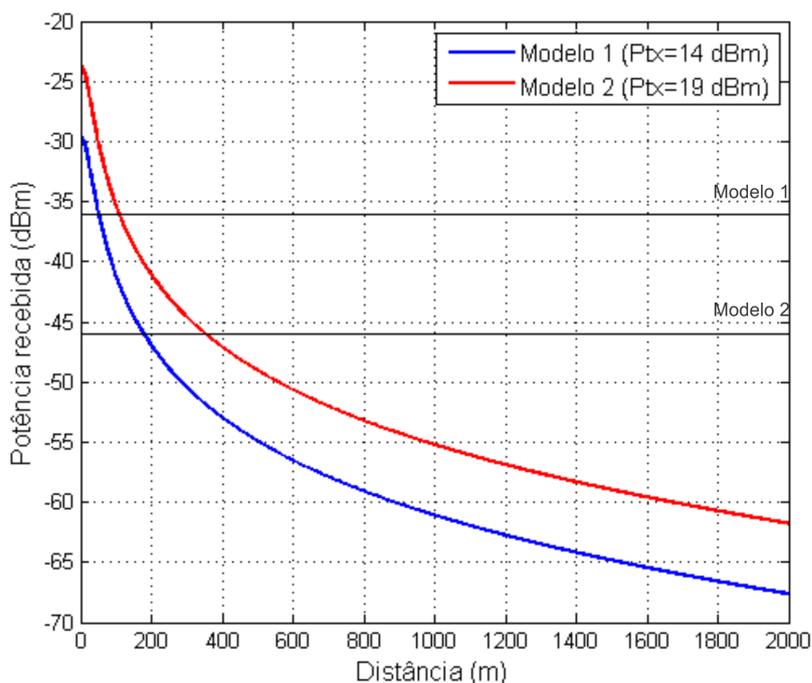


Figura 3.32 – Balço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Eduardo Gomes.

A partir dos resultados apresentados na Figura 3.32, o alcance do enlace sob as condições mencionadas na Tabela 3.16, seria de aproximadamente 50 m (Modelo 1) e 355 m (Modelo 2), valores significativamente inferiores ao alcance proposto para o enlace hipotético.

Região Sudeste

Tabela 3.17 – Dados para o balço de potência realizado em São Paulo – SP.

P_{tx} (Modelo 1)	14 dBm
P_{tx} (Modelo 2)	19 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 1)	-36 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 2)	-46 dBm
S_T e S_R	0,0023 m ²
C_n^2	10 ⁻¹⁵
Ângulo de divergência	2 mrad
Comprimento de onda central	850 nm
Visibilidade	600 m
Precipitação	29,8 mm
Margem de segurança	5 dB

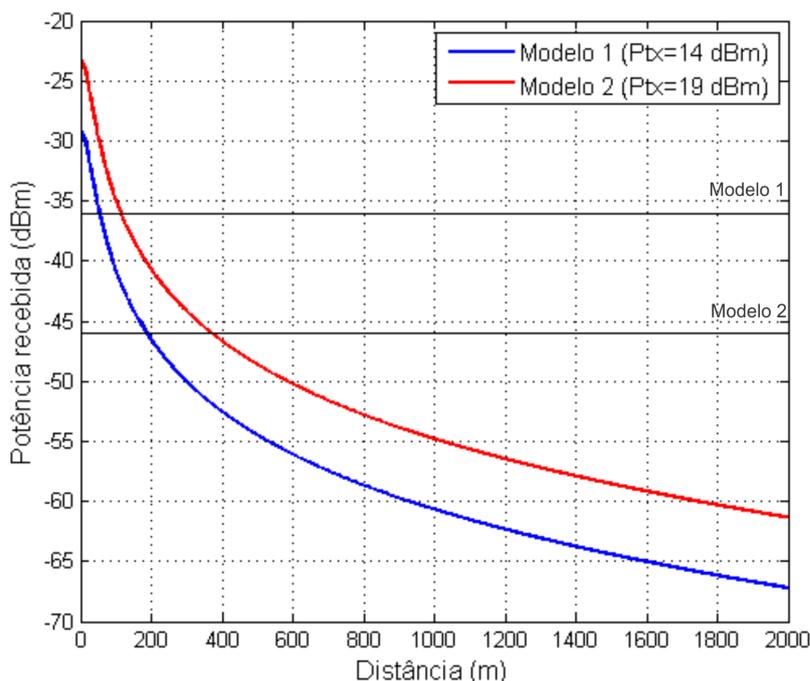


Figura 3.33 – Balanco de potência, sob as condições locais do Aeroporto de Guarulhos.

De acordo com os resultados apresentados, é visto que o alcance do enlace instalado sob as condições mencionadas na Tabela 3.17 seria de aproximadamente 54 m, para o Modelo 1 e 370 m para o Modelo 2. Essa distância foi um pouco maior que a alcançada na cidade de Manaus e isso se deve ao fato da taxa de precipitação analisada no período em São Paulo, ter sido 1,4 mm menor que a apresentada em Manaus.

Região Sul

Tabela 3.18 – Dados para o balanco de potência realizado em Porto Alegre – RS.

P_{tx} (Modelo 1)	14 dBm
P_{tx} (Modelo 2)	19 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 1)	-36 dBm
Sensibilidade do receptor (Modelo 2)	-46 dBm
S_T e S_R	0,0023 m ²
C_n^2	10 ⁻¹⁵
Ângulo de divergência	2 mrad
Comprimento de onda central	850 nm
Visibilidade	1000 m
Precipitação	22,4 mm
Margem de segurança	5 dB

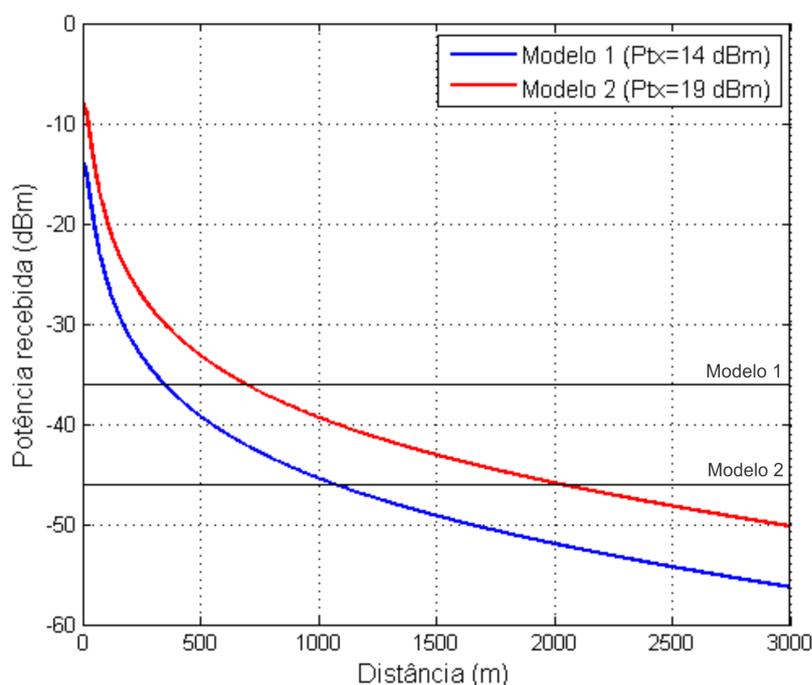


Figura 3.34 – Balanço de potência, sob as condições locais do Aeroporto Salgado Filho.

O alcance do enlace sob as condições apresentadas, seria de aproximadamente 345 m, para o Modelo 1 e 2,05 km de acordo com os dados do Modelo 2. Este alcance é maior do que os que foram apresentados nas cidades de São Paulo e Manaus. Isto se deve à ocorrência de um maior valor de visibilidade registrado no período, além de menores taxas de precipitação em relação às duas cidades.

De acordo com os resultados apresentados para os balanços de potência das cidades representativas das regiões brasileiras, considerando os dados dos modelos selecionados nesta análise, apenas as cidade de Recife – PE, João Pessoa – PB, Brasília – DF e Porto Alegre – PA, atingiram o alcance proposto para o enlace hipotético de 2 km.

3.4 – Previsão de Disponibilidade

A disponibilidade do sistema corresponde à porcentagem de tempo em que a condição meteorológica será igual ou melhor em função da atenuação apresentada pelo feixe. Uma das recomendações utilizadas para a análise da disponibilidade é a norma ITU-T G.826, que consiste em uma recomendação para enlaces de sistemas de telecomunicações, sem se preocupar com o meio utilizado na transmissão [4], tendo em vista que não há ainda uma recomendação que leve em consideração todos os parâmetros dos enlaces ópticos no espaço livre.

A disponibilidade dos enlaces poderá ser obtida por meio das funções cumulativas de probabilidade de visibilidade e precipitação dos locais analisados [4], [22]. Com base nessas funções, caso em determinada cidade, por exemplo, a visibilidade seja igual ou superior a 5 km,

em $x\%$ do tempo, isso indica que o alcance do enlace sob essas condições, estará disponível ou funcionando em $x\%$ do tempo. Na literatura, a disponibilidade ideal para enlaces ópticos no espaço livre é, superior a 99,9% do tempo, mas disponibilidades iguais ou superiores a 99% são comumente aceitáveis [4], [8].

A partir dos resultados apresentados nos balanços de potência, considerando que foram tomados dados que ocorreram em 90% do tempo analisado para visibilidades mínimas e 99% para precipitação máxima, é possível indicar uma disponibilidade a uma percentual de 99% para os alcances máximos que os enlaces obtiveram em todas as cidades. Isso porque apesar dos dados não serem horários, mas os piores casos registrados diariamente, é possível prever que a disponibilidade para esses valores pode ser maior ou no máximo igual, conforme pode ser observado na Tabela 3.19. Ou seja, os valores considerados nos balanços de potência, apesar de terem sido selecionados a um percentual de 90% dos valores mínimos registrados diariamente, ao relacionar com dados horários essa taxa se torna igual a 99%. E em relação às taxas de precipitação os valores são considerados a uma taxa de 99 %.

Com base nessas informações, é apresentada na Tabela 3.19 a frequência de ocorrência de diferentes valores de visibilidade nas cidades representativas das regiões brasileiras, em 2012. A partir das funções cumulativas de probabilidade de visibilidade apresentadas no ANEXO B, que são baseadas em dados horários coletados da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

Tabela 3.19 – Frequência de visibilidade em cidades do Brasil.

Visibilidade (km)	≥ 10	≥ 9	≥ 8	≥ 7	≥ 6	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 1	$\geq 0,5$	≥ 0
João Pessoa	95,53%	95,7%	96,11%	96,18%	96,63%	98,83%	99,69%	100%	100%	100%	100%
Recife	94,47%	94,9%	96,68%	96,85%	97,45%	99,26%	99,76%	99,97%	100%	100%	100%
Porto Alegre	79,1%	80,62%	84%	85,42%	87,46%	94,85%	96,63%	98,39%	98,76%	99,54%	100%
Brasília	93,93%	95,38%	96,22%	96,84%	97,78%	98,84%	99,29%	99,64%	99,7%	99,83%	100%
Manaus	89,49%	90%	91,68%	92,05%	92,52%	94,83%	95,9%	96,7%	97,5%	99,2%	100%
São Paulo	62,79%	66,5%	73,1%	79,04%	84,34%	94,84%	97,3%	98,3%	98,69%	99,53%	99,98%

Conforme discutido neste capítulo, é possível confirmar, de acordo com a Tabela 3.19, a baixa frequência de visibilidades em situações de céu limpo e nevoeiro leve na cidade de São Paulo, seguida de Porto Alegre e Manaus, comparadas às demais cidades do País. Isto pode refletir em frequências de disponibilidade inferiores a 99%, para enlaces instalados nesses locais, para a maioria das visibilidades.

Previsão de Disponibilidade em Função da Visibilidade

Com base na Tabela 3.19, é apresentada a disponibilidade para um enlace, em função apenas da visibilidade, por meio da Equação 2.2. Esses dados são mostrados nas Tabelas 3.20 a 3.25 e foram obtidos utilizando os seguintes requisitos: transceptor do fabricante *Lightpointe*,

Tabela 3.24 – Disponibilidade para enlace em Manaus – AM em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).

Raio (km)	0,05	0,2	0,6	1	1,2	1,4	1,8	2
Disponibilidade ($V = 2km$)	96,7%	96,7%	96,7%	96,7%	96,7%	96,7%	96,7%	96,7%
Disponibilidade ($V = 3km$)	95,9%	95,9%	95,9%	95,9%	95,9%	95,9%	95,9%	95,9%
Disponibilidade ($V = 4km$)	94,83%	94,83%	94,83%	94,83%	94,83%	94,83%	94,83%	94,83%
Disponibilidade ($V = 6km$)	92,52%	92,52%	92,52%	92,52%	92,52%	92,52%	92,52%	92,52%

Tabela 3.25 – Disponibilidade para enlace em São Paulo – SP em diferentes valores de visibilidade (Margem de segurança de 6 dB).

Raio (km)	0,05	0,2	0,6	1	1,2	1,4	1,8	2
Disponibilidade ($V = 2km$)	98,3%	98,3%	98,3%	98,3%	98,3%	98,3%	98,3%	98,3%
Disponibilidade ($V = 3km$)	97,3%	97,3%	97,3%	97,3%	97,3%	97,3%	97,3%	97,3%
Disponibilidade ($V = 4km$)	94,84%	94,84%	94,84%	94,84%	94,84%	94,84%	94,84%	94,84%
Disponibilidade ($V = 6km$)	84,34%	84,34%	84,34%	84,34%	84,34%	84,34%	84,34%	84,34%

Por meio dos resultados obtidos, foi possível observar que as melhores disponibilidades verificadas ocorreram nas cidades de Recife, João Pessoa e Brasília, com destaque para as cidades do Nordeste que, historicamente apresentam baixa frequência de visibilidades em situação de nevoeiro.

Com base nas características que foram consideradas para o enlace nesta análise, em todas as cidades, em situações de visibilidades menores ou iguais a 1 km, o sistema estaria abaixo da sensibilidade do receptor em alcances superiores a 1,9 km.

Dispersão em Enlaces Ópticos no Espaço Livre

Em estudos sobre feixes de luz que se propagam em um meio guiado, a análise da dispersão ocasionada pelo meio material em que a luz é transmitida que, em fibras ópticas geralmente corresponde a vidro ou sílica pura ou dopada, é um fator importante em sua implementação, tendo em vista que a dispersão pode ocasionar alargamento do pulso final resultante, ou seja, distorção do sinal por meio de ligeiros atrasos dos pulsos de entrada que chegam ao receptor. O alargamento de pulso é dependente do índice de refração do material, largura espectral e comprimento do enlace [15], [42].

Em meios ópticos não-guiados não é diferente, o meio material é o ar atmosférico que é sujeito a condições adversas analisadas nos Capítulos 2 e 3. Entre essas condições a turbulência ocasionada pela colisão dos feixes ópticos com bolsões de ar cuja dimensão é inferior ao diâmetro do feixe (cintilação), resulta em ligeiros atrasos na frente de onda do sinal. O principal parâmetro que a caracteriza é o parâmetro estrutural do índice de refração (C_n^2), que depende do índice de refração do meio, pressão e temperatura do ar. Vale destacar que, conforme analisado no Capítulo 2, as fontes transmissoras e os fotodetectores utilizados em enlaces ópticos no espaço livre, são semelhantes aos utilizados em fibras ópticas. Logo, as fontes luminosas são sujeitas ao parâmetro de largura espectral.

Nesse capítulo será analisada a dispersão do sinal e o alargamento de pulso resultante ocasionado em enlaces FSO considerando a largura espectral, a distância do enlace e o parâmetro estrutural do índice de refração, que caracteriza o meio material (ar atmosférico), tomando como referência medidas de temperatura e pressão local. Adicionalmente será analisada uma situação para valores padrões de temperatura e pressão, para enlaces em alturas fixas, que poderá ser tomada como referência em medições futuras.

4.1 – Conceitos de Dispersão e Distorção do Sinal

A partir de uma onda monocromática se propagando na direção z , tem-se a seguinte equação

$$\psi = A \cos(\omega t - \beta z), \quad (4.1)$$

A fase da onda varia de acordo com a expressão

$$\varphi(t, z) = \omega t - \beta z, \quad (4.2)$$

em que, φ corresponde à fase da onda, ω à variação da fase com o tempo $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)$ e β , a variação da fase em relação à posição $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)$.

O lugar geométrico dos pontos de mesma fase de onda que se propaga no meio, é denominado frente de onda. Para o cálculo da superfície referente à frente de onda, é necessário impor a condição de que a fase é constante e dada por [18]

$$\varphi(t, z) = \omega t - \beta z = k, \quad (4.3)$$

em que, k é uma constante e representa um argumento em radianos. Para que a condição seja satisfeita, à medida em que o tempo passe o valor de z aumenta, indicando o deslocamento da frente de onda com o tempo, de modo que a diferença entre os termos permaneça constante. A rapidez desse movimento é a velocidade de fase. Derivando a Equação 4.3, em relação ao tempo, tem-se

$$\omega - \beta \left(\frac{dz}{dt}\right) = 0, \quad (4.4)$$

em que, $\left(\frac{dz}{dt}\right)$ é a taxa de variação do deslocamento em função do tempo, ou seja, a velocidade de deslocamento da frente de onda. Deste modo

$$v_f = \frac{\omega}{\beta}. \quad (4.5)$$

Em um meio dispersivo, a velocidade de fase (v_f) é dependente do comprimento de onda por meio do parâmetro β .

As fontes reais utilizadas em comunicações ópticas não emitem luz apenas em um comprimento de onda, mas em uma faixa de comprimentos de onda, denominada largura espectral da fonte. Logo, torna-se necessário analisar o comportamento conjunto das frentes de onda que se propagam ao mesmo tempo. Como os valores de frequência são muito próximos, as interferências darão origem a um sinal resultante da soma das componentes quase em fase, que caracteriza uma interferência construtiva, passando por defasagens gradativamente maiores, até chegar a um ponto de componentes quase em contrafase (interferência destrutiva) [18].

O sinal composto resultante, possui uma velocidade de propagação denominada velocidade de grupo, isto é, a velocidade do conjunto de componentes, com sua forma preservada. Para a verificação do movimento da onda, toma-se um valor de amplitude fixa e observa-se como ele se comporta, como se desloca na medida em que o tempo passa. Esse deslocamento por unidade de tempo indica a velocidade de grupo da onda, dada por [15], [18]

$$v_g = \left[\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right]^{-1}. \quad (4.6)$$

É possível verificar na Equação 4.6, que o cálculo resulta no inverso da derivada do fator de fase com a frequência angular.

Em meios não-dispersivos, com características eletromagnéticas independentes da frequência, a velocidade de grupo é igual a velocidade de fase. No entanto, a existência de meios não-dispersivos é apenas uma aproximação de condições reais, comumente há alteração no formato da onda na medida em que se propaga, ocasionando dispersão. Nesse meio, a velocidade das componentes depende da frequência de cada uma delas, caracterizando o meio dispersivo. Logo, em um certo ponto, as relações de fase não se mantêm no trajeto da onda e seu formato é modificado [18].

Índice de Refração

A relação entre a velocidade da luz no vácuo e em um outro meio, é denominada índice de refração absoluto e pode ser representado, levando em consideração as velocidades de fase e grupo, por

$$n_f = \frac{c}{v_f}, \tag{4.7}$$

$$n_g = \frac{c}{v_g}, \tag{4.8}$$

em que, v_f é a velocidade de fase e v_g é a velocidade de grupo.

Em meios materiais, como fibras ópticas, o índice de refração varia com a frequência do sinal transmitido e com as características do meio que, por sua vez, estão relacionadas com às variações atômicas e moleculares. Desta forma e de acordo com a aproximação da equação de Sellmeier, o índice de refração é dado por [15], [18]

$$n^2(w) = 1 + \sum_{i=1}^M \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \tag{4.9}$$

em que, λ e λ_i são, respectivamente, o comprimento de onda da frequência do sinal transmitido e o comprimento de onda correspondente à frequência de ressonância da ordem i . Este último parâmetro é obtido empiricamente e depende das características do meio como, por exemplo, a quantidade de dopantes. O somatório considera os pontos de ressonância do material. Esses valores são tabelados pelos fabricantes de fibra e, para a sílica pura são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores dos coeficientes da fórmula de Sellmeier para a sílica pura [15].

A_1	A_2	A_3	λ_1	λ_2	λ_3
0,6961663	0,4079426	0,8974794	0,0684043	0,1162414	9,896161

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.1, aplicados a Equação 4.9, o comportamento do índice de refração da fibra de sílica pura segue o gráfico apresentado na Figura 4.1.

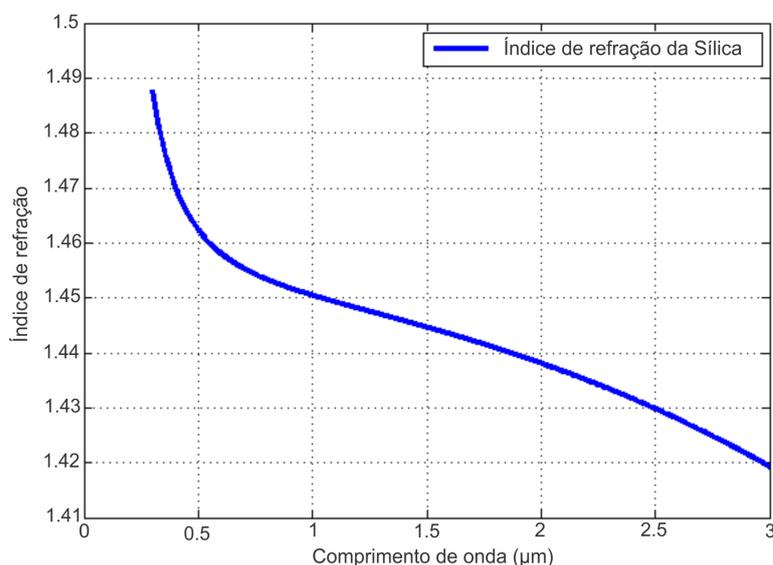


Figura 4.1 – Efeito do comprimento de onda sobre o valor do índice de refração da sílica pura.

De acordo com o comportamento da curva apresentado na Figura 4.1, é observada a relação inversa entre o comprimento de onda e o índice de refração do material.

Trabalhos como [43] e [44] analisam os parâmetros mencionados e a influência do comprimento de onda do sinal, e incluem parâmetros como as variações de temperatura e pressão no estudo do índice de refração das fibras ópticas, comprovando a influência do material, sobretudo, na dispersão da luz em seu interior.

Dispersão Material

A dispersão material influencia a propagação das diferentes componentes do sinal, uma vez que existe uma relação inversa entre os comprimentos de onda propagados e o índice de refração do material. Isto ocasiona atrasos de propagação das componentes do sinal e, conseqüentemente, um alargamento temporal em relação ao sinal transmitido, que se reflete em uma sobreposição entre pulsos adjacentes, denominada interferência intersimbólica. Uma importante condição para a dedução do alargamento de pulso devido à dispersão parte da relação dos conceitos de velocidade de fase e velocidade de grupo. Os dados experimentais do índice de refração são geralmente obtidos em função do comprimento de onda. Assim, partindo da Equação 4.6 e aplicando a regra da cadeia, obtém-se [18]

$$v_g = \left[\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right]^{-1} = \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \beta}. \tag{4.10}$$

Considerando, $\omega = \frac{2\pi v_f}{\lambda}$ e $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ e calculando as derivadas, é obtida a expressão

$$v_g = (2\pi)^2 \left[\frac{1}{\lambda^2} \left(\lambda \frac{\partial v_f}{\partial \lambda} - v_f \frac{\partial \lambda}{\partial \lambda} \right) \right] \left(\frac{-1}{\beta^2} \right) = v_f - \lambda \left(\frac{\partial v_f}{\partial \lambda} \right). \quad (4.11)$$

A partir da Equação 4.11, analisando o comportamento da velocidade de grupo em relação ao comprimento de onda do sinal, é obtida a expressão

$$\frac{\partial v_g}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(v_f - \lambda \frac{\partial v_f}{\partial \lambda} \right), \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial v_g}{\partial \lambda} = -\lambda \frac{\partial^2 v_f}{\partial \lambda^2}. \quad (4.13)$$

A expressão do fator de fase relacionando o comprimento de onda com o índice de refração, pode ser obtida a partir da relação entre a frequência angular e a velocidade da luz no vácuo, dada por

$$\beta = \frac{\omega n}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda}, \quad (4.14)$$

A derivada do fator de fase em relação ao comprimento de onda resulta em

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{dn}{d\lambda} - \frac{n}{\lambda} \right], \quad (4.15)$$

sabendo que $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda}$, reorganizando

$$\omega = 2\pi c \lambda^{-1}. \quad (4.16)$$

A derivada da frequência angular ω em relação ao comprimento de onda λ , conduz a

$$d\omega = -2\pi c \lambda^{-2} d\lambda, \quad (4.17)$$

da qual é possível obter a diferencial $d\lambda$ em termos da diferencial $d\omega$. Utilizando a Equação 4.17 em 4.15 tem-se

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left[n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right] = \frac{1}{v_g}. \quad (4.18)$$

A partir da Equação 4.8 sabe-se que o índice de refração de grupo corresponde à relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade de grupo do sinal guiado. Desta forma, tem-se [18]:

$$n_g = \frac{c}{v_g} = n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (4.19)$$

De acordo com a Equação 4.19, é possível observar que, se o índice de refração diminuir com o aumento do comprimento de onda, o fator de derivada será negativo. No entanto, devido ao sinal negativo já existente na fórmula, o índice de refração do grupo será maior que o do

material. Devido à relação inversa que há entre o índice de refração de grupo e a velocidade de grupo, esta velocidade será menor que a velocidade de fase do sinal. Desta forma, o meio será caracterizado como dispersivo normal, classificação comumente dada a materiais utilizados na faixas de frequências ópticas.

Caso o índice de refração aumente com o comprimento de onda, o meio dispersivo é caracterizado como anômalo. Em situações em que há independência entre o comprimento de onda e o índice de refração, a variação entre esses parâmetros se torna nula, caracterizando um meio não-dispersivo. No entanto, conforme mencionado, meios não-dispersivos são um caso hipotético [18].

A variação do índice de refração com o comprimento de onda é um fator importante no comportamento do campo eletromagnético. É importante lembrar que as fontes reais emitem luz em uma faixa de comprimentos de onda e não em um único comprimento de onda. Logo, deve-se analisar também de que forma essa largura espectral influencia a dispersão do sinal e, conseqüentemente, ocasiona o alargamento de pulso. O alargamento de pulso ou aumento temporal é definido como [42], [45]

$$\Delta t = \frac{dt}{d\lambda} \Delta \lambda, \quad (4.20)$$

em que, é apresentada a variação do tempo de propagação em relação ao comprimento de onda. Levando em consideração que o tempo de propagação do sinal pode ser obtido pela razão entre a distância do enlace e a velocidade de grupo, ele resultará em

$$t = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c} \left[n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \right], \quad (4.21)$$

Derivando o tempo de propagação em relação ao comprimento de onda, obtém-se

$$\frac{dt}{d\lambda} = -\frac{L}{c} \lambda \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right), \quad (4.22)$$

A partir dessas soluções, a Equação 4.20 resulta em

$$\Delta t = -\frac{L}{c} \lambda \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right) \Delta \lambda, \quad (4.23)$$

Com base na Equação 4.23, é definido o parâmetro de dispersão material, dado por [42], [45]

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right), \quad (4.24)$$

em que, D_M é em $ps/nm \times km$. Empiricamente, para a sílica pura, no intervalo de $1,25 \mu m$ a $1,66 \mu m$, o parâmetro de dispersão material é aproximado por [15]

$$D_{MS} \approx 122 \left(1 - \frac{\lambda_{ZD}}{\lambda} \right) \quad (4.25)$$

em que, $\lambda_{zD}=1,276 \mu\text{m}$ e corresponde ao comprimento de onda em que os valores de dispersão são negativos abaixo dele e positivos acima. De acordo com as soluções apresentadas, é possível observar a dependência da dispersão material com características inerentes ao meio de transmissão.

A curva da dispersão material para a fibra de sílica pura pode seguir o comportamento da Figura 4.2.

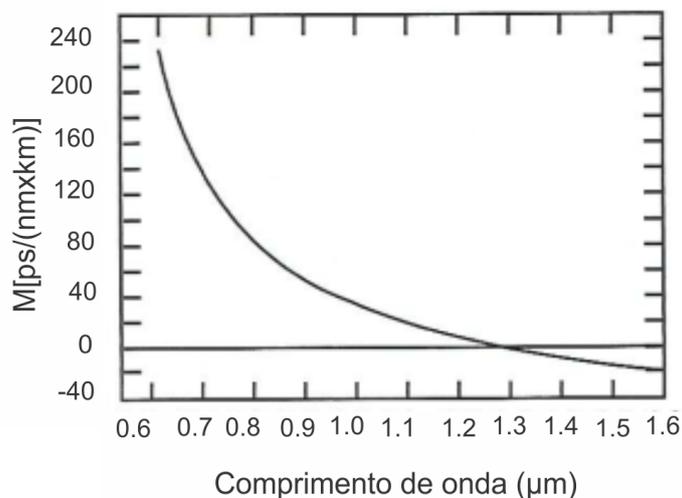


Figura 4.2 – Dispersão material para a Sílica pura [42].

Alargamento de pulso

Ao trabalhar com uma fonte cuja largura espectral é não-nula, os pulsos apresentam comprimentos de onda diferentes que se propagam pelo meio em diferentes velocidades, chegando ao receptor em tempos ligeiramente diferentes. Esses pulsos são somados, resultando em um pulso alargado, comparativamente ao pulso inicial. Logo, a dispersão material provoca um alargamento do pulso, ou seja, uma distorção do sinal. Esse alargamento, conforme discutido, é função da dispersão material, ou seja, das variações do índice de refração do meio, dados o comprimento de onda do sinal e as características inerentes ao meio. Ele também é função da distância, pois quanto maior for a distância percorrida pelo feixe de luz, maior será o alargamento do pulso, assim como da largura espectral da fonte ou seja, do número de diferentes comprimentos de onda que se propagarão no meio. Quanto maior a largura espectral, maior será o alargamento de pulso. Logo, todos os parâmetros estão diretamente relacionados ao alargamento.

Analicamente, o alargamento de pulso é representado por [18]

$$\Delta(\tau) = |D_M| \Delta\lambda L, \tag{4.26}$$

em que, $\Delta(\tau)$ representa o alargamento de pulso do sinal, $|D_M|$ é a dispersão material, $\Delta\lambda$ é a largura espectral da fonte em nm e L é a distância do enlace em km.

4.2 – Dispersão Atmosférica do Canal Óptico

Em enlaces ópticos no espaço livre, a variação do índice de refração ocorre em função do comprimento de onda do feixe, mas também da pressão e da temperatura do meio (ar atmosférico). Na literatura atual, alguns autores aproximam o comprimento de onda em $\lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$ [12], desconsiderando a influência do comprimento de onda, o que resulta na Fórmula 2.16 para o índice de refração do meio atmosférico apresentada no Capítulo 2. Na análise deste capítulo, é considerada e testada a influência dos diferentes comprimentos de onda utilizados na transmissão dos feixes ópticos no espaço livre e a fórmula do índice de refração passa a ser dada de forma completa por [46]

$$n(R) = 1 + 77,6 \times 10^{-6} (1 + 7,52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P(R)}{T(R)}, \quad (4.27)$$

em que, λ , é o comprimento de onda do feixe de luz em micrômetros, $P(R)$ é a pressão atmosférica em milibares (mbar) e $T(R)$ é a temperatura do ar em Kelvin.

Conforme discutido no Capítulo 2, a turbulência atmosférica ocorre por meio de massas de ar misturadas que agem como bolsões de ar com diferentes tamanhos e geralmente com diferentes valores de temperatura e pressão, que ocasionam pequenas variações dinâmicas nos valores do índice de refração do ar. Essa redistribuição do índice de refração no tempo e no espaço ocasiona efeitos no feixe de luz, como flutuações temporais na irradiação e na fase [11]. Considerando que um dos principais efeitos da turbulência é a cintilação [11], [26], esta ocasiona distorções na frente de onda, por meio da difração e refração do feixe e, conseqüentemente as componentes da frente de onda atingem o receptor em tempos ligeiramente diferentes [26].

No entanto, é importante destacar que, conforme discutido, as fontes transmissoras utilizadas nos enlaces ópticos no espaço livre, assim como as fibras ópticas, apresentam comprimentos de onda que se propagam em uma faixa em torno do comprimento de onda central da fonte. Logo, ao se propagarem pelo canal atmosférico, os diferentes valores também influenciarão o índice de propagação do meio, e isto pode ser analisado a partir da Fórmula 4.27, conforme representado na Figura 4.3.

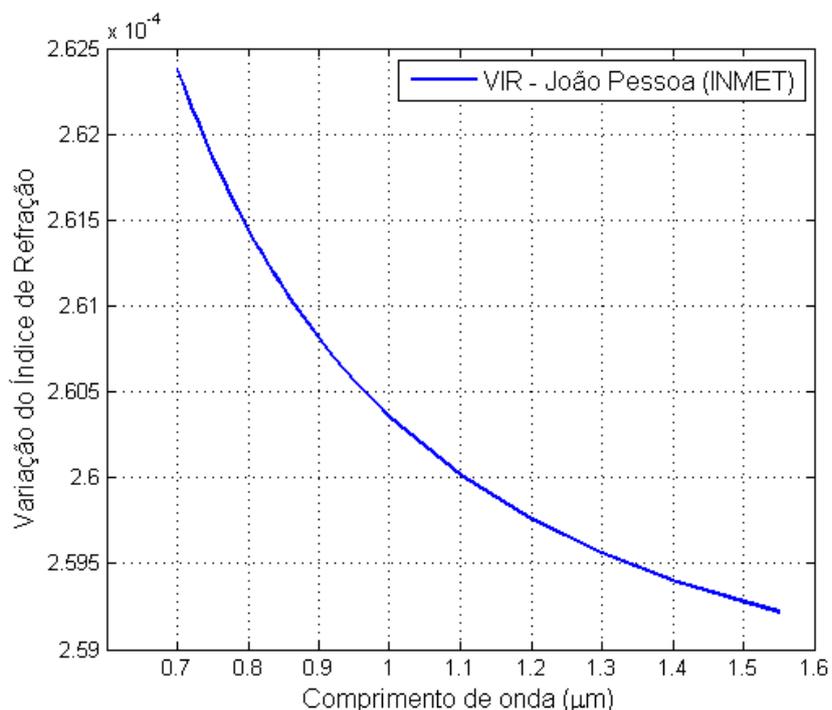


Figura 4.3 – Variação do índice de refração do ar em João Pessoa - PB (Estação INMET).

Na Figura 4.3 é representada a variação do índice de refração do ar em relação a μm , para valores fixos de temperatura e pressão ($T = 302 \text{ K}$ e $P = 1009 \text{ mbar}$) registrados às 13 horas (maior registro de temperatura), do dia 01/01/2012 na Estação do INMET, localizada nas coordenadas ($7^\circ 9'57.00''\text{S}$, $34^\circ 48'55.00''\text{O}$), em João Pessoa - PB, para diferentes comprimentos de onda.

É possível observar que, à medida em que o comprimento de onda aumenta, os valores do índice de refração diminuem. De forma semelhante, ocorre a variação do índice de refração da fibra óptica de sílica, apresentada na Figura 4.1. Ou seja, é possível observar variação no índice de refração de acordo com o comprimento de onda utilizado e esta variação diminui em comprimentos de onda maiores, tanto nas fibras de sílica quanto nos enlaces ópticos no espaço livre.

Na Figura 4.4 é apresentada a variação do índice de refração na mesma estação ao longo das 24 horas do dia, por meio de valores de pressão e temperatura horários, para os principais comprimentos de onda utilizados em enlaces ópticos no espaço livre ($0,78 \mu\text{m}$, $0,85 \mu\text{m}$ e $1,55 \mu\text{m}$).

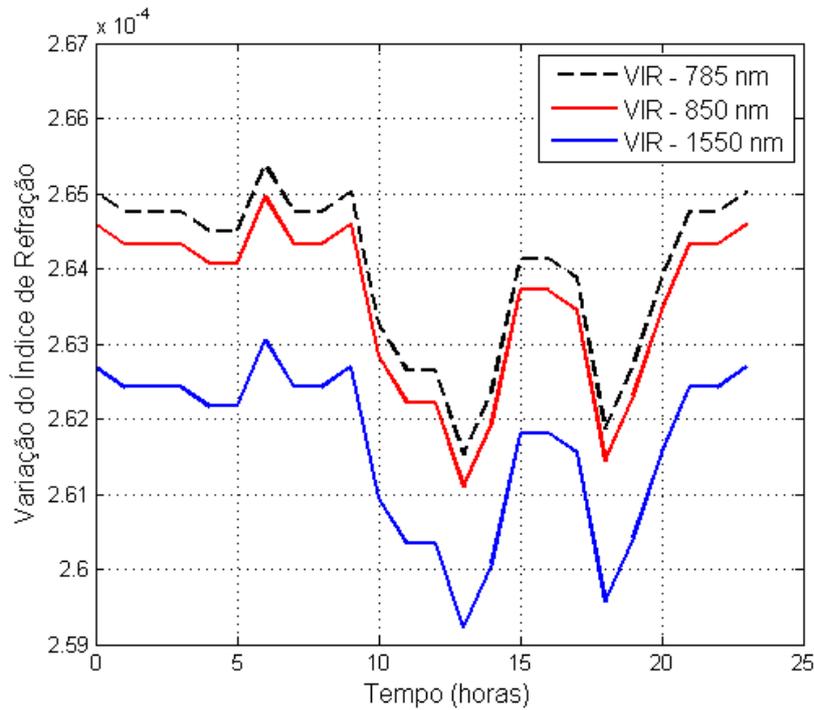


Figura 4.4 – Variação do índice de refração do ar ao longo do dia em João Pessoa - PB (Estação INMET).

Da Figura 4.4, é possível observar de forma mais clara a influência de diferentes comprimentos de onda na variação do índice de refração. As variações do índice de refração ocasionadas pelo fluxo turbulento com a formação de bolsões de ar, além de ocasionarem a difração do sinal, também causarão dispersão, por meio dos diferentes comprimentos de onda que seguem o trajeto e que também influenciarão o índice de refração do meio, conforme observado nas Figuras 4.3 e 4.4.

Devido às variações do índice de refração com o comprimento de onda, o tempo de propagação no canal atmosférico também varia, e dessa forma ocasiona um alargamento temporal ou distorção do pulso transmitido [47]. Um dos parâmetros mais importantes na análise dos efeitos de turbulência e que reflete a influência do índice de refração, é o C_n^2 , que mede a intensidade de flutuação do índice de refração no caminho do feixe, conforme discutido no Capítulo 2. Conforme a Equação 4.27, é possível obter uma expressão para o parâmetro de estrutura do índice de refração sob a influência de diferentes comprimentos de onda, dada por [46]

$$C_n^2 = \left[77,6 \times 10^{-6} (1 + 7,52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T^2} \right]^2 \frac{(T_1 - T_2)^2}{R^{2/3}}, \quad (4.28)$$

na qual, T_1 e T_2 são temperaturas do ar medidas por termômetros separados por uma distância R em metros, T é a temperatura média entre os dois pontos e P é a pressão atmosférica em mbar. Flutuações na pressão atmosférica são geralmente desprezadas, por não apresentarem influência significativa no parâmetro [12].

Em enlaces horizontais próximos ao solo, ou seja, na camada limite da atmosfera (até aproximadamente 1 km acima do solo) em uma distância fixa e altura constante, o parâmetro C_n^2 é considerado constante [12] e comumente adotado para o comprimento do enlace, conforme apresentado em [4], [11] e [22].

Considerando que a turbulência é aproximadamente homogênea na horizontal [48], ou seja, há variação do índice de refração mas essa variação obedece à mesma regra ao longo do espaço ou linha de propagação, o que indica que o parâmetro de flutuação do índice de refração (C_n^2) é constante ao longo do percurso [47]. O parâmetro reflete de forma aproximada a intensidade de flutuação do índice de refração ao longo do caminho. Com base nisso, partindo da teoria da dispersão material para as fibras ópticas, apresentada na Equação 4.24, substituindo o índice de refração da fibra pelo parâmetro de flutuação do índice de refração (C_n), tem-se

$$D_A = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2 C_n}{d\lambda^2} \right), \quad (4.29)$$

em que, D_A , representa o parâmetro de dispersão atmosférica, em ps/nmxkm. Resolvendo sua segunda derivada em relação ao comprimento de onda ($d^2 C_n / d\lambda^2$), tem-se

$$\frac{d^2 C_n}{d\lambda^2} = \left[77,6 \times 10^{-6} (7,52 \times 10^{-3} 6\lambda^{-4}) \frac{P}{T^2} \right] \frac{|(T_1 - T_2)|}{\sqrt{R^{2/3}}}, \quad (4.30)$$

Substituindo a Equação 4.30 em 4.29, o parâmetro de dispersão atmosférica estendido para enlaces de mesma altura resulta

$$D_A = -\frac{\lambda}{c} \left[77,6 \times 10^{-6} (7,52 \times 10^{-3} 6\lambda^{-4}) \frac{P}{T^2} \right] \frac{|(T_1 - T_2)|}{\sqrt{R^{2/3}}}, \quad (4.31)$$

no qual, $|(T_1 - T_2)|$ corresponde à diferença de temperatura entre os dois pontos em módulo, o que mantém o caráter positivo do parâmetro, assim como é descrito no parâmetro C_n^2 , no qual independente da temperatura tomada como referência, o resultado será o mesmo, R é a distância entre os pontos em km e c é a velocidade da luz em km/s.

Para uma atmosfera padrão baseada em $T = 288,16$ K e $p = 1013,3$ mbar, a dispersão material poderá ser dada por

$$D_{AIR} = -\frac{\lambda}{c} \left(\frac{d^2 n(R)}{d\lambda^2} \right), \quad (4.32)$$

em que, D_{AIR} , representa o parâmetro de dispersão atmosférica, em ps/nmxkm e $d^2 n(R) / d\lambda^2$ é a segunda derivada do índice de refração atmosférico em relação ao comprimento de onda.

4.2.1 – Alargamento de Pulso na Atmosfera

Com base na solução para a dispersão atmosférica, o alargamento de pulso do feixe transmitido em enlaces ópticos no espaço livre é dado por

$$\Delta(\tau) = |D_A| \Delta\lambda L, \quad (4.33)$$

em que, $\Delta(\tau)$ representa o alargamento de pulso do sinal, $|D_A|$ é a dispersão atmosférica, $\Delta\lambda$, a largura espectral da fonte em nm e L , a distância do enlace em km. É possível observar que, esta expressão adaptada para enlaces ópticos no espaço livre possui dependência direta com a distância do enlace, a dispersão material e a largura espectral da fonte luminosa. Logo quanto maiores forem esses parâmetros, maior o alargamento de pulso do feixe.

Em uma atmosfera padrão baseada em $T = 288,16$ K e $p = 1013,3$ mbar para estações situadas em uma mesma altura, o alargamento de pulso pode ser dado por

$$\left(\frac{\Delta\tau}{L}\right) = |D_{AIR}| \Delta\lambda, \quad (4.34)$$

em que, $\left(\frac{\Delta\tau}{L}\right)$ representa o alargamento de pulso do sinal por unidade de comprimento (ps/km), $|D_{AIR}|$ é a dispersão atmosférica, $\Delta\lambda$ é a largura espectral da fonte em nm. Baseando-se nessas características para a atmosfera, o alargamento por unidade de comprimento será o mesmo para diferentes distâncias do enlace em estações situadas na mesma altura e horizontalmente homogêneas.

4.2.2 – Cálculo da Dispersão e Alargamento de Pulso na Atmosfera

Análise do local

Para calcular a dispersão e o alargamento de pulso na atmosfera foram selecionadas duas estações meteorológicas na cidade de Campo Grande – MS, localizadas nas coordenadas (20°29'59.77"S, 54°37'12.11"O) e (20°27'16.31"S, 54°36'56.94"O). Essas estações pertencem, respectivamente, ao INPE e ao INMET¹ e distam 5 km entre si.

¹Informações obtidas dos Bancos de Dados Climatológicos do INPE e INMET

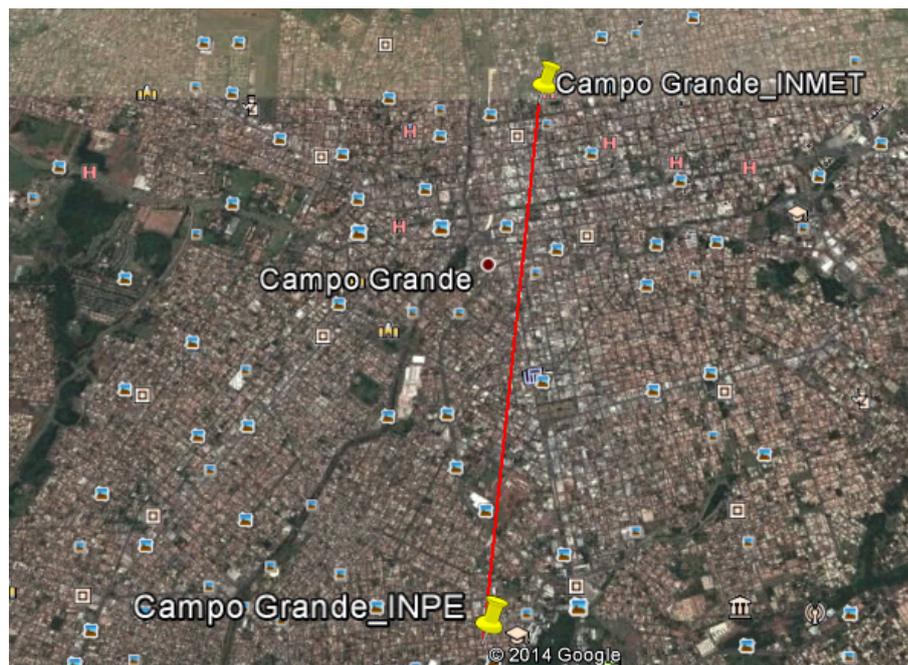


Figura 4.5 – Imagem de localização das estações meteorológicas do INPE e INMET obtidas pelo *Google Earth*.

De acordo com a literatura e manuais de instalação de estações meteorológicas em institutos nacionais, os sensores de temperatura são instalados em aproximadamente 1,5 metros de altura acima do solo, e a pressão é medida em caixas meteorológicas com o registrador de dados, aproximadamente na mesma altura dos sensores de temperatura, fixados em torres de 10 metros [49], [50], [51]. Nesta análise é considerada a medição da temperatura e pressão em uma mesma altura. Com base nessas informações foram analisadas as altitudes dos dois pontos, de modo a verificar a visada direta do enlace, e para validar a altura constante das estações hipotéticas, situadas em pontos fixos. Por meio do programa Sigantel [52] é apresentada a altitude entre os pontos, representada pela Figura 4.6.

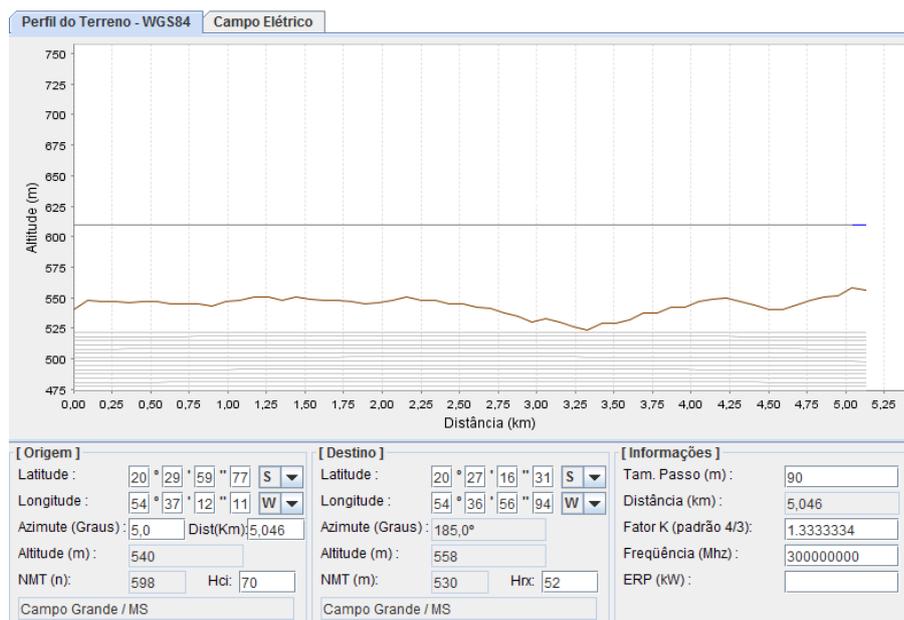


Figura 4.6 – Perfil do terreno e linha de visada das estações meteorológicas do INPE e INMET, em Campo Grande – MS.

Da Figura 4.6, é possível observar que as altitudes dos dois pontos foram de 558 m e 540 m nas estações do INMET e INPE, respectivamente. De modo a manter o enlace em uma mesma altura, foi considerada uma estação hipotética com um acréscimo de altura acima das medições, de modo a equiparar as alturas entre os pontos. Para isso, além das altitudes, foram verificadas as possíveis obstruções verticais ocasionadas por edificações na linha de visada. Essa verificação foi realizada com o auxílio do programa *Google Earth*, que permite a visualização em imagem 3D de edificações e do local por meio da ferramenta *Street View*. Com o auxílio dessa ferramenta, foi possível observar um prédio de aproximadamente 60 m, distante 970 m da estação do INMET. Com base nas altitudes do local e das estações do INMET e INPE, foram consideradas nas estações hipotéticas alturas iguais a 52 metros e 70 m conforme Hci e Hrx, mostrados na Figura 4.6. Desse modo, foi possível validar alturas constantes e linha de visada direta entre os pontos do enlace.

Os valores de pressão e temperatura dos dois pontos, registrados às 12 horas do dia 01/01/2010, são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de pressão e temperatura, nas estações do INPE e INMET, às 12 horas, do dia 01/01/2010.

Estações Meteorológicas	T (°C) a 1,5 m acima do solo	P (mbar) a 1,5 m acima do solo	Altitude acima do nível do mar (m)
INPE	25,5	948	540
INMET	25,3	948,8	558

Correção da Temperatura com a Altitude

A troposfera corresponde à camada atmosférica acima da superfície da Terra, situada entre 0 e 12 km acima do nível do mar e é a camada em que estão situados os enlaces

ópticos horizontais no espaço livre. Nessa camada, a variação da temperatura com a altitude é considerada aproximadamente linear, diminuindo a uma taxa de $-6,5^{\circ}\text{C}$ a cada 1000 m acima do solo [53]. Essa variação pode ser obtida por meio de [54]

$$T = T_0 - BZ, \tag{4.35}$$

em que, em uma atmosfera padrão T_0 equivale a 288,16 K (temperatura ao nível do mar) e B é igual a uma constante dada por 0,00650 K/m [54]. Z corresponde a altitude do ponto.

A variação da temperatura, nesta análise, é considerada por meio de uma expressão adaptada com base nessa taxa de variação para as alturas de 52 m e 70 m acima do solo, considerando como referência as medições de temperaturas realizadas pelos termômetros a 1,5 m de altura acima do solo nas estações, de modo a se obter uma análise mais precisa de acordo com as condições reais. Os valores obtidos com a análise realizada são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores de temperatura, nas estações do INPE e INMET.

Estações	$T_M(^{\circ}\text{C})^*$	Altura da estação hipotética (m)	$D_{AL}(\text{m})^{**}$	$T_R(^{\circ}\text{C})$ a 70 m e 52 m ^{***}
INPE	25,5	70	68,5	25,05
INMET	25,3	52	50,5	25

*Temperatura medida pelos termômetros a 1,5 m de altura

**Diferença entre as alturas (Termômetro/Estação hipotética)

***Temperatura resultante para as estações em mesma altura total

Os resultados representados pela sigla T_R , correspondem à temperatura resultante dada por

$$T_R = T_M - (V_T D_{AL}), \tag{4.36}$$

na qual, T_M corresponde à temperatura medida pelos termômetros situados a 2 m acima do solo, V_T corresponde ao valor ($6,5 \times 10^{-3} \text{C}$), que é a variação da temperatura a cada 1 m acima do solo até o limite de 1000 m e D_{AL} corresponde à diferença de altura entre os termômetros e o topo da estação hipotética.

Correção da Pressão com a Altitude

A variação da pressão com a altitude na troposfera ocorre exponencialmente e pode ser analisada por meio de [54]

$$p = p_0 - \left(1 - \frac{BZ}{T_0}\right)^m, \tag{4.37}$$

em que m é igual a 5,26, no ar. Em uma atmosfera padrão, T_0 corresponde a temperatura padrão ao nível do mar, igual a 288,16 K, e p_0 , é a pressão padrão ao nível do mar (1013,3 mbar).

A Fórmula 4.38, apresenta a variação da pressão com a altitude, considerando os valores de pressão e temperatura a 1,5 m do solo, baseados em medições nas estações meteorológicas.

$$p_R = p_M - \left(1 - \frac{BZ}{T_R}\right)^m, \tag{4.38}$$

em que, p_M e T_R são a pressão e a temperatura a 1,5 m de altura, respectivamente.

Tabela 4.4 – Valores de temperatura, nas estações do INPE e INMET na altura das estações hipotéticas.

Estações	p_M (mbar)*	Altura da estação hipotética (m)	D_{AL} (m)**	p_R (mbar) a 70 m e 52 m***
INPE	948	70	60	947
INMET	948,8	52	42	947,9

*Pressão medida pelos sensores a 1,5 m de altura

**Diferença entre as alturas (Pressão e temperatura/Estação hipotética)

***Pressão resultante para as estações em mesma altura total

Análise do Local para a Temperatura e Pressão de uma Atmosfera Padrão

Uma outra análise realizada considerou como referência a temperatura e pressão padrão, a pressão ao nível do mar equivale a 1013,3 mbar e a temperatura a 288,16 K. Essa atmosfera de referência é a mais comum e é baseada em latitudes médias do hemisfério Norte, chamada de *International Standard Atmosphere* (ISA) [55], utilizada em estudos da aeronáutica do país. Tomando como referências esses valores, são analisadas as variações de temperatura e pressão para as altitudes totais das estações, resultantes da soma da altitude do local e da altura das estações a partir das Equações 4.35 e 4.37, conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores de temperatura e pressão baseados em valores padrões.

Estações	p_0 (mbar)	T_0 (°C)	Altura da estação hipotética (m)	Altitude(m)	Altura total(m)	p_h (mbar)*	T_h (°C)**
INPE	1013,13	15	70	540	610	942	11,5
INMET	1013,13	15	52	558	610	942	11,5

*Pressão no topo das estações obtida por meio de (4.37)

**Temperatura no topo das estações obtida por meio de (4.35)

Com base na Tabela 4.5, é possível observar que, considerando a temperatura e pressão padrão como referência na atmosfera padrão, os valores resultantes de pontos em mesma altitude são iguais. Assim, com este resultado, os valores do índice de refração em estações de mesma altura total, ou seja na mesma linha de propagação também serão iguais, conforme Fórmula 4.27, sendo dependente apenas do comprimento de onda utilizado. Em uma atmosfera padrão, cujos valores de pressão e temperatura sejam padrões, a dispersão material pode ser baseada na Equação 4.32 e o alargamento de pulso em 4.34.

Dispersão

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.4 para as alturas das estações hipotéticas e considerando que a distância do enlace é igual a 5 km, é possível analisar os valores de dispersão atmosférica a partir da Equação 4.31, conforme Figura 4.7.

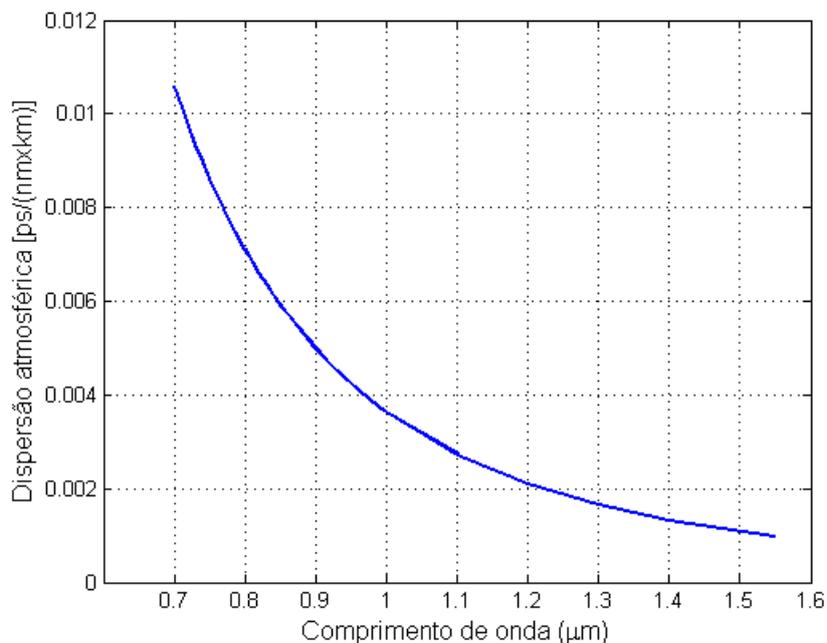


Figura 4.7 – Dispersão atmosférica para diferentes comprimentos de onda.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.7 é possível observar que, com o aumento do comprimento de onda a dispersão material diminui e que no período analisado na cidade de Campo Grande - MS, o valor de dispersão máximo foi igual a 0,011 ps/nmxkm em 0,70 μm . Nos comprimentos de onda geralmente utilizados em enlaces ópticos no espaço livre, os valores foram iguais a 0,008 ps/nmxkm, 0,006 ps/nmxkm e 0,001 ps/nmxkm, para os comprimentos de onda de 785 nm, 850 nm e 1550 nm, respectivamente.

De acordo com a Equação 4.32 e com base em variações dos valores de temperatura e pressão padrões em uma atmosfera de referência por meio da altitude, a variação da dispersão atmosférica em função do comprimento de onda é mostrada na Figura 4.8.

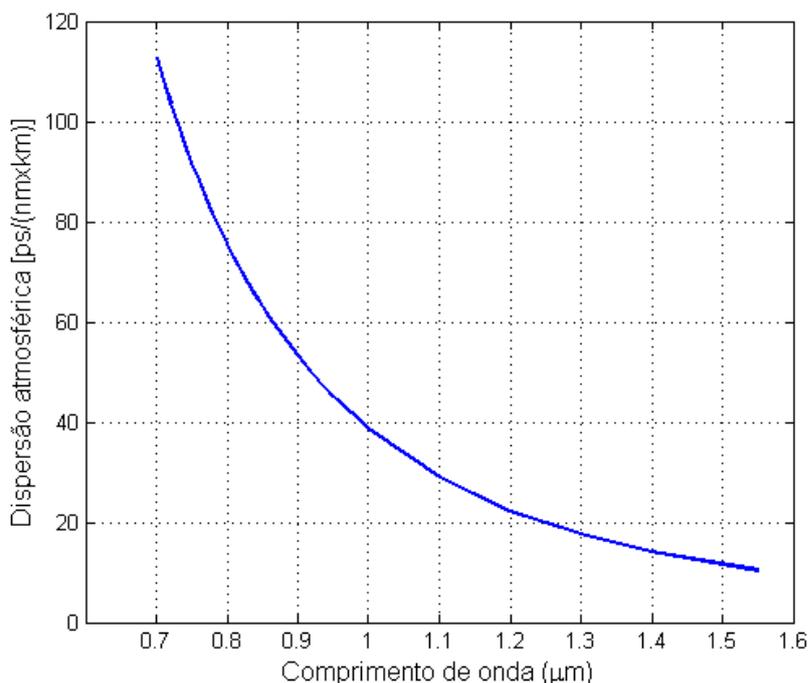


Figura 4.8 – Dispersão atmosférica para diferentes comprimentos de onda utilizando valores de pressão e temperatura padrão.

Com base nos resultados, é possível observar que considerando os valores de pressão e temperatura padrão em uma mesma altura, os valores dos índices de refração resultantes serão os mesmos em ambos os pontos e considerando que horizontalmente ele se manterá constante ao longo do percurso, os valores de dispersão serão maiores, tendo em vista que não haverá flutuação horizontal no percurso, o índice de refração não será dependente da distância do enlace, mas apenas da altitude entre os pontos. Nos comprimentos de onda de 785 nm, 850 nm e 1550 nm, os valores da dispersão são 80 ps/nmxkm, 63 ps/nmxkm e 10,40 ps/nmxkm, respectivamente.

Alargamento de Pulso

A partir dos resultados encontrados para a dispersão nos diferentes comprimentos de onda na atmosfera, apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, foram selecionados os valores referentes aos comprimentos de onda usualmente utilizados em enlaces ópticos no espaço livre. Com base na distância do enlace entre as estações do INPE e INMET, assim como valores de largura espectral de fontes luminosas geralmente utilizadas em enlaces ópticos no espaço livre, conforme discutido no Capítulo 2, obtidos de folhas de dados de alguns fabricantes, para valores de temperatura e pressão de referência baseados nas medições das estações do INPE e INMET e nos valores padrões em uma atmosfera padrão, foram encontrados os resultados para alargamento de pulso apresentados nas Tabelas 4.6 a 4.12, obtidos por meio das Equações 4.33 e 4.34, respectivamente.

Tabela 4.6 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (850 nm - $\Delta\lambda = 0,85$ nm) [56].

Comprimento de onda central	850 nm
Largura espectral	0,85 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,006 ps/nmxkm
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	63 ps/nmxkm
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,03 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	53,5 ps/km

Tabela 4.7 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (1550 nm - $\Delta\lambda = 0,5$ nm) [57].

Comprimento de onda central	1550 nm
Largura espectral	0,5 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,001 ps/nmxkm
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	10,4 ps/nmxkm
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,001 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	5,2 ps/km

Tabela 4.8 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (780 nm - $\Delta\lambda = 0,85$ nm) [58].

Comprimento de onda central	780 nm
Largura espectral	0,85 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,008 ps/nmxkm
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	81,5 ps/nmxkm
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,033 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	69,3 ps/km

Tabela 4.9 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa VCSEL (840 nm - $\Delta\lambda = 0,65$ nm) [59].

Comprimento de onda central	840 nm
Largura espectral	0,65 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,006 ps/nmxkm
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	65,27 ps/nmxkm
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,020 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	42,4 ps/km

Tabela 4.10 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa DFB (1550 nm - $\Delta\lambda = 1$ nm) [60].

Comprimento de onda central	1550 nm
Largura espectral	1 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,00098 ps/nm \times km
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	10,38 ps/nm \times km
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,0059 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	10,38 ps/km

Tabela 4.11 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa FP (1550 nm - $\Delta\lambda = 1,3$ nm) [61].

Comprimento de onda central	1550 nm
Largura espectral	1,3 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,00098 ps/nm \times km
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	10,38 ps/nm \times km
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,0063 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	13,5 ps/km

Tabela 4.12 – Dados para cálculo do alargamento de pulso - Fonte luminosa FP (852 nm - $\Delta\lambda = 3$ nm) [62].

Comprimento de onda central	852 nm
Largura espectral	3 nm
Distância do enlace	5 km
Dispersão atmosférica	0,006 ps/nm \times km
Dispersão atmosférica para valores de temperatura e pressão padrão	62,5 ps/nm \times km
Alargamento de pulso ($\Delta\tau$)	0,09 ps
Alargamento de pulso para valores de temperatura e pressão padrão ($\frac{\Delta\tau}{L}$)	187,47 ps/km

Com base nos valores mostrados nas Tabelas 4.6 a 4.12, a Figura 4.9 apresenta resultados para o alargamento de pulso em função do comprimento de onda, a partir de valores de temperatura e pressão mensurados nas estações meteorológicas, considerando as larguras espectrais encontradas em folhas de dados de fabricantes de fontes luminosas e utilizadas em enlaces ópticos no espaço livre.

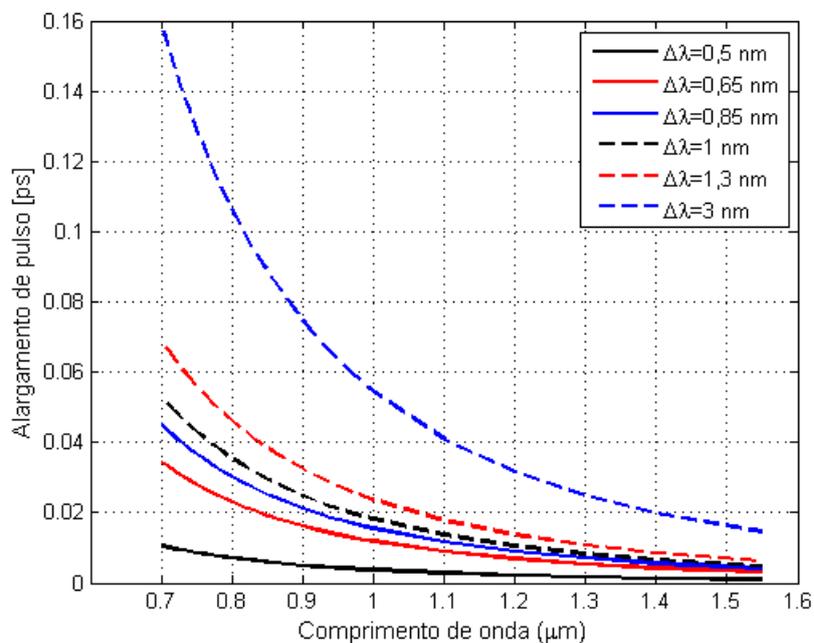


Figura 4.9 – Variação do alargamento de pulso para diferentes comprimentos de onda e valores de largura espectral, tomando como referência pressão e temperatura mensurados nas estações.

Da Figura 4.9, é possível observar que conforme os resultados apresentados nas Tabelas 4.6 a 4.12, o alargamento de pulso diminui em comprimentos de onda maiores e para larguras espectrais estreitas. De acordo com esses resultados o maior valor de alargamento de pulso foi de aproximadamente 0,16 ps, para o comprimento de onda de 0,7 μm e largura espectral de 3 nm. Já o menor valor obtido para o alargamento de pulso foi 0,001 ps, para o comprimento de onda de 1,55 μm e largura espectral de 0,5 nm.

Na Figura 4.10, é representado o alargamento de pulso para diferentes valores de comprimentos de onda e largura espectral, de acordo com a Equação 4.34, tomando como referência temperatura e pressão padrão, que resultou em valores iguais de índice de refração para ambos os pontos, situados na mesma altura.

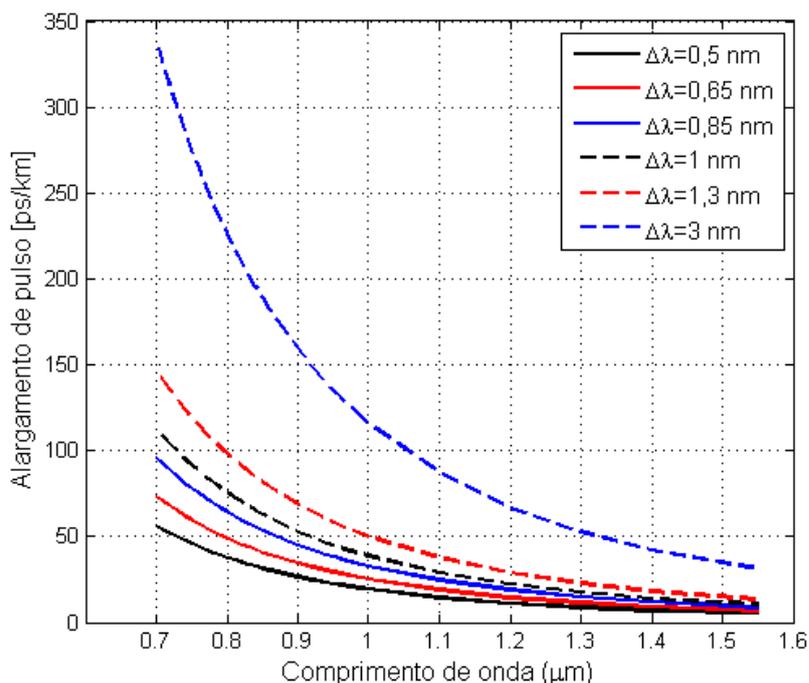


Figura 4.10 – Variação do alargamento de pulso para diferentes comprimentos de onda e valores de largura espectral, tomando como referência pressão e temperatura padrão.

A partir dos resultados na Figura 4.10 e das Tabelas 4.6 a 4.12 é possível observar que o alargamento de pulso é superior ao apresentado pela Figura 4.10. Na primeira figura são consideradas as flutuações do índice de refração em função da distância para o local específico analisado, tomando como referência medidas do local. Conforme observado, essa flutuação foi pequena, tendo em vista que os valores de temperatura e pressão em ambos os pontos, apesar de serem diferentes, foram aproximados ao se corrigir os valores para a mesma altura. Na Figura 4.10 foi analisada uma situação de atmosfera padrão para as alturas fixas do enlace com base em valores padrões, desconsiderando as condições específicas locais. Também foi desconsiderada, neste caso, a flutuação do índice pela distância, o que influenciou no aumento do valor da dispersão atmosférica. Apesar da análise aproximada da Figura 4.10, essas medidas podem ser tomadas como referência para medições futuras.

De acordo com os resultados encontrados, percebe-se que os valores de dispersão e alargamento de pulso são menores para o meio atmosférico, em relação às fibras ópticas. Isto pode ser verificado pela variação do índice de refração na atmosfera que é inferior e aproximadamente igual a um, comparativamente ao índice de refração das fibras. Contudo, os fatores de atenuação apresentados no Capítulo 2 se apresentam em intensidade maior nos enlaces ópticos no espaço livre. Apesar disso, para uma metodologia adequada para os enlaces ópticos no espaço livre, que reflita as condições atmosféricas da forma mais aproximada da situação real, e que leve em consideração o maior número de fatores que influenciam o enlace, a dispersão não deve ser desprezada.

Nesta dissertação, foram apresentados estudos sobre os enlaces ópticos no espaço livre, com o objetivo de apresentar uma metodologia de projeto para estes enlaces. Para isso, foram apresentados os dispositivos transmissores e receptores de enlaces FSO, as principais normas de segurança e os modelos de canal atmosférico existentes na literatura, que servem de embasamento teórico para a análise dos efeitos.

Neste contexto, buscou-se utilizar um modelo de canal que considere o maior número de efeitos atmosféricos simultâneos. Foram escolhidas seis cidades representativas das cinco regiões brasileiras: João Pessoa – PB, Recife – PE, Manaus – AM, Brasília – DF, Porto Alegre – RS e São Paulo – SP. Esta análise foi realizada com estatísticas de visibilidade mínima e precipitação horária máxima, no período de 2010 a 2012. Com base nos resultados, verificou-se uma maior ocorrência de nevoeiros nas cidades de Porto Alegre, Manaus e São Paulo. Além disso, por meio de funções cumulativas de probabilidade, foram selecionados registros de visibilidade mínima no ano de 2012 que, em 90% do tempo, a ocorrência de visibilidades mínimas foi de valores maiores ou iguais aos valores selecionados. Já para a precipitação, foram selecionados valores que em 99% do tempo, a ocorrência de taxas de precipitação foram de valores menores ou iguais aos selecionados. A partir desses dados, foram realizados balanços de potência para as cidades analisadas, com base em dados de dois modelos de transceptores da *Terescope*, com potências iguais a 14 dBm e 19 dBm, considerando a aplicação em um enlace hipotético com alcance de 2 km.

Por meio dos resultados obtidos, foi possível verificar que, em todas as cidades, com a utilização do Modelo 1 (14 dBm) o alcance do enlace foi inferior a 2 km. E para o Modelo 2 (19 dBm), apenas as cidades de Recife – PE, João Pessoa – PB, Porto Alegre – RS e Brasília – DF atingiram o alcance de 2 km, com destaque para as cidades do Nordeste e Brasília – DF que atingiram distâncias superiores a 2,1 km. Adicionalmente, foi realizada a previsão de disponibilidade para esses enlaces, baseada em funções cumulativas de probabilidade de visibilidade e precipitação. Com base nos valores de precipitação máxima e visibilidade mínima utilizados no cálculo dos balanços, foi possível prever uma disponibilidade de 99% para os enlaces.

Além disso, buscando tornar a metodologia de projeto mais completa, foi desenvolvido um modelo para a dispersão do canal atmosférico, considerando que as fontes luminosas dos

enlaces ópticos no espaço livre, assim como as fibras ópticas, possuem largura espectral diferente de zero. Para esta análise foi considerado um cenário com enlaces ópticos horizontais em alturas iguais e constantes. Por meio das expressões encontradas e de folhas de dados de fontes luminosas disponíveis comercialmente, foram obtidos valores de dispersão e alargamento de pulso, considerando como referência valores de pressão e temperatura padrões e obtidos com base em medições do INPE e INMET. Os resultados obtidos indicaram valores de dispersão e alargamento de pulso abaixo dos valores encontrados nos sistemas de fibras ópticas. Isto pode ser verificado pela variação do índice de refração na atmosfera, que é inferior ao índice de refração das fibras ópticas e aproximadamente igual a 1. Apesar disso, na elaboração de uma metodologia adequada para enlaces ópticos no espaço livre, que se aproxime da situação real, este parâmetro não pode ser desprezado.

Considerando os resultados obtidos com a análise realizada, pode-se concluir que a metodologia desenvolvida pode ser empregada de forma eficiente no projeto de enlaces ópticos no espaço livre. O estudo desenvolvido neste trabalho está coerente com os modelos já existentes e foi mais além, no sentido de complementar as lacunas desses modelos, desenvolvendo uma metodologia de projeto mais completa, capaz de auxiliar o profissional ou as empresas interessadas no fornecimento da tecnologia.

Como proposta de trabalho futuro, propõe-se que também é interessante ser desenvolvida uma metodologia de projetos para enlaces verticais, considerando a influência dos diferentes efeitos atmosféricos com a altura, inclusive do parâmetro de flutuação do índice de refração. Essa metodologia pode ser aplicada tanto na realização do balanço de potência, quanto na análise da influência da dispersão, considerando estações com diferentes alturas.

Referências Bibliográficas

- [1] D. K. Borah, A. C. Boucouvalas, C. C. Davis, S. Hranilovic, and K. Yannopoulos, "A review of communication-oriented optical wireless systems," in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 91, 2012.
- [2] S. Kazemlou, S. Hranilovic, and S. Kumar, "All-optical multihop free-space optical communication systems," *Lightwave Technology*, vol. 29, no. 18, pp. 2663–2669, 2011.
- [3] I. K. Son, *Design and optimization of free space optical networks*. Tese de doutorado, Auburn University, Auburn, Alabama, 2010.
- [4] J. A. H. Osorio, "Simulação e desenvolvimento de um enlace de free-space optics no Rio de Janeiro e a relação com a ITU-T G826," dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro - RJ, 2005.
- [5] J. F. M. A. Júnior, "Modelagem experimental de um Link FSO com inserção de feixes não difrativos," dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - SP, 2013.
- [6] F. Gouveia, "Projeto de um Transceptor Óptico para Comunicação Digital em Espaço Livre," dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2007.
- [7] D. Killinger, "Free space optics for laser communication through the air," in *Optics and Photonics News*, vol. 13, pp. 36–42, OSA, 2002.
- [8] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. de Fornel, and P.-N. Favennec, *Free-space optics: propagation and communication*. London, W1T 5DX, U.K.: ISTE Ltd, 1 ed., 2006.
- [9] S. V. Kartalopoulos, *Free space optical networks for ultra-broad band services*. New Jersey, U.S.A.: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [10] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, and G. H. Sasaki, *Optical networks: a practical perspective*. Burlington, U.S.A.: Morgan Kaufmann, 3 ed., 2010.
- [11] T. V. N. Coelho, "Estudo de sistemas de somunicação utilizando óptica no espaço livre," dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro- RJ, 2008.

- [12] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham, Washington, U.S.A.: SPIE The International Society for Optical Engineering, 2 ed., 2002.
- [13] I. I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, "Comparision of LASER beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," in *Optical Wireless Communications III*, SPIE, no. 4214, 2001.
- [14] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications*. Boca Raton, Flórida, U.S.A.: CRC Press, 2013.
- [15] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*. New York, NY, U.S.A.: John Wiley e Sons, Inc, 3 ed., 2002.
- [16] S. O. Wireless, "Sonabeam models overview." <http://www.fsona.com/product>, 2002. Online; acesso em 15 de maio de 2014.
- [17] I. Lightpointe Communications, 2006. Folha de dados: Flightstrata 155E/Flightstrata G.
- [18] J. A. J. Ribeiro, *Comunicações ópticas*. São Paulo - SP: Érica, 4 ed., 2003.
- [19] S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster, and H. Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics," *Optical Networking*, no. 6, 2003.
- [20] M. C. B. Brandalize and I. J. Philips, "Padrões de classificação de equipamentos laser utilizados em levantamentos terrestres e aéreos," vol. 1, (Florianópolis - SC), Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, 2002.
- [21] A. K. Majumdar and J. C. Ricklin, "Effects of the atmospheric channel on free-space laser communications," vol. 5892, SPIE, 2005. Proc. of SPIE 58920K-1.
- [22] L. B. dos Santos, "Análise de sistemas de comunicação utilizando óptica no espaço livre ," dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro- RJ, 2008.
- [23] M. L. de Andrade Pinto, "Relação empírica da visibilidade com profundidade óptica, concentração de aerossóis e focos de queimadas em Alta Floresta e Cuiabá," dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2001.
- [24] C. P. Colvero, *Análise experimental de sistemas de comunicações ópticas no espaço livre em diferentes comprimentos de onda*. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- [25] M. A. Naboulsi, H. Sizun, and F. de Fornel, "Fog attenuation prediction for optical and infrared waves," in *Optical Engineering*, vol. 43, 2004.

- [26] I. I. Kim and R. Stieger, "Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the terraLink laser communication system," in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1998.
- [27] G. K. Rodrigues, "Estudo da influência atmosférica em um sistema digital com multiplexação em código," dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- [28] M. C. R. Cordeiro, *Avaliação experimental dos efeitos de cintilação no canal óptico no espaço livre em 780 nm, 1550 nm e 9100 nm*. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- [29] D. J. C. Coura, "Análise dos principais efeitos da propagação de sinais ópticos no espaço livre, revestida de uma plataforma numérica eficiente," dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí - SP, 2004.
- [30] I. Lightpointe Communications, "Optical wireless technology overview." <http://www.lightpointe.com/freespaceoptics/fsotechnology.html>. Online; acesso em 01 de junho de 2014.
- [31] J. E. Graves and S. Drenker, "Advancing free-space optical communications with adaptive optics." <http://www.lightpointe.com/freespaceoptics/fsotechnology.html>, 2002. Online; acesso em 20 de junho de 2014.
- [32] A. Prokes, "Atmospheric effects on availability of free space optics systems," in *Optical Engineering*, vol. 48, SPIE, 2009.
- [33] R. S. Nóbrega and T. V. da Silva Lemos, "O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade de Recife," in *Revista de Geografia (UFPE)*, vol. 28, UFPE, 2011.
- [34] L. S. de Albuquerque Wanderley, R. C. Moretti, and T. O. Pordeus, "Vulnerabilidade à ocorrência de eventos extremos de precipitação na região metropolitana de Recife," in *Universidade Federal de Pernambuco - Departamento de Ciências Geográficas*, UFPE, 2012.
- [35] M. de Luna Freire Duarte, "Comportamento microclimático Urbano: estudo de caso de um recorte urbano em João Pessoa - PB," dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2010.
- [36] J. S. Lima, "Previsão de ocorrência e duração de nevoeiro em Porto Alegre: método objetivo," in *Congresso Brasileiro de Meteorologia (Cbmet)*, II, 1982.

- [37] F. Wiegand, "Circulações atmosféricas clássicas e não-clássicas na região metropolitana de Porto Alegre - RS," dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2000.
- [38] G. P. Ribeiro, "Conforto ambiental, sustentabilidade e meio ambiente: estudo de caso Hospital Sarah Kubitschek - Brasília," III Fórum de Pesquisa FAU.MACKENZIE, 2007.
- [39] D. X. Silva, C. Barcellos, and R. Bacuri, "Diagnóstico preliminar da vulnerabilidade e as previsões dos efeitos das mudanças climáticas na saúde pública no município de Manaus," Organização Panamericana de Saúde, 2010.
- [40] M. J. de Miranda, H. S. Pinto, J. Z. Júnior, R. M. Fagundes, D. B. Fonsechi, L. Calve, and G. Q. Pellegrino, "Clima dos municípios paulistas." Online: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>. CEPAGRI - Meteorologia UNICAMP.
- [41] I. MRV Communications, *Terescope overview*, 2007. Folha de dados: Terescope 4000/5000.
- [42] J. R. de Almeida Amazonas, *Projeto de sistemas de comunicações ópticas*. Barueri, SP: Manole Ltda., 1 ed., 2005.
- [43] G. Ghosh, M. Endo, and T. Iwasaki, "Temperature-dependent sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses," *Lightwave Technology*, vol. 12, no. 8, pp. 1338–1342, 1994.
- [44] G. Ghosh and H. Yajima, "Pressure-dependent sellmeier coefficients and material dispersions for silica fiber glass," *Lightwave Technology*, vol. 16, no. 11, pp. 2002–2005, 1994.
- [45] A. L. da Rocha Abbade, "Limites impostos pela dispersão por modo de polarização em sistemas ópticos de elevada taxa de transmissão," dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí - MG, 2008.
- [46] J. D. Schmidt, *Numerical simulation of optical wave propagation*. Washington, U.S.A.: SPIE, 2010.
- [47] G. J. V. Segatto, "Modelamento e análise de desempenho de sistema de transmissão óptica pela atmosfera," dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 1996.
- [48] L. S. Freire, "Teorias de camada limite atmosférica: modelo de crescimento, fluxo de estranhamento e análise espectral," dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2012.
- [49] Instituto Nacional de Meteorologia, *Rede de estações meteorológicas automáticas do INMET*, 2011. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET.

- [50] T. R. Oke, "Initial guidance to obtain representative meteorological observation at urban sites," tech. rep., World Meteorological Organization, Canadá, 2006.
- [51] "Guide to meteorological instruments and methods of observation," Tech. Rep. 8, World Meteorological Organization, Suíça, 2008.
- [52] ANATEL, "Siganatel." <http://www.sistemas.anatel.gov.br>, 2014. Online; acesso em 20 de junho de 2014.
- [53] R. G. Barry and R. J. Chorley, *Atmosfera, tempo e clima*. Porto Alegre - RS: Bookman, 9 ed., 2013.
- [54] F. M. White, *Mecânica dos fluídos*. São Paulo - SP: AMGH, 6 ed., 2011.
- [55] Airbus, "Getting to grips with aircraft performance," tech. rep., France, 2002.
- [56] AllDdatasheets, 2011. Folha de dados: VCSEL TMC5F40.
- [57] R. Optoelectronic. AllDdatasheets, 2011. Folha de dados: VCSEL RC33xxx2-T.
- [58] R. Optoelectronic. AllDdatasheets, 2011. Folha de dados: VCSEL RC44xxx2-T.
- [59] F. O. C. Division. AllDdatasheets, 2007. Folha de dados: VCSEL HFE7192.
- [60] Luminentoic, 2003. Folha de dados: DFBC-15-DFB-E-LHX-NT.
- [61] Modulight, *Fabry-Perot TO-56*, 2008. Folha de dados: Fabry-Perot TO-56.
- [62] JDSU, *Fabry-Perot 54xx Series*, 2011. Folha de dados: Fabry-Perot 54xx Series.

ANEXOS

Funções Cumulativas de Probabilidade de Visibilidade e Precipitação Diárias em 2012

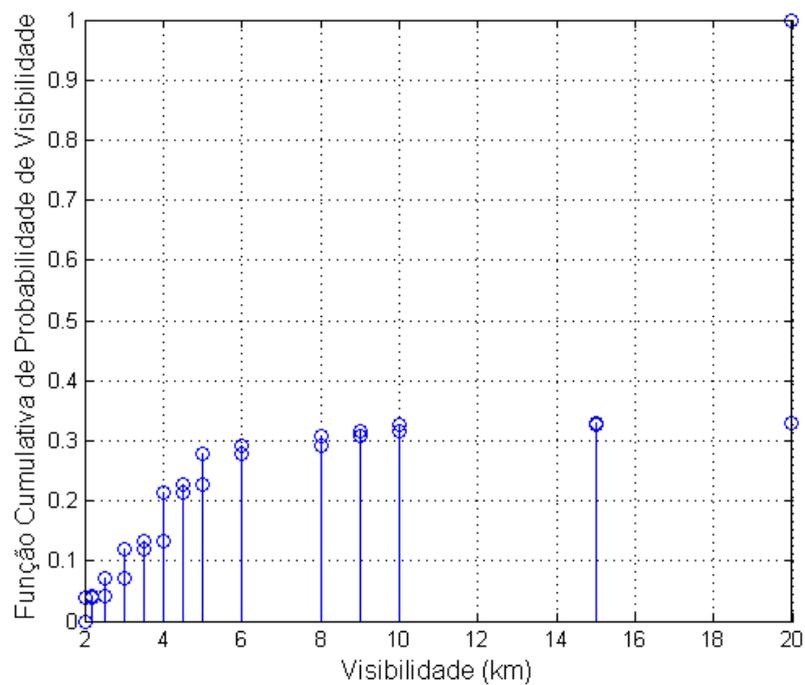


Figura A.1 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, em João Pessoa – PB.

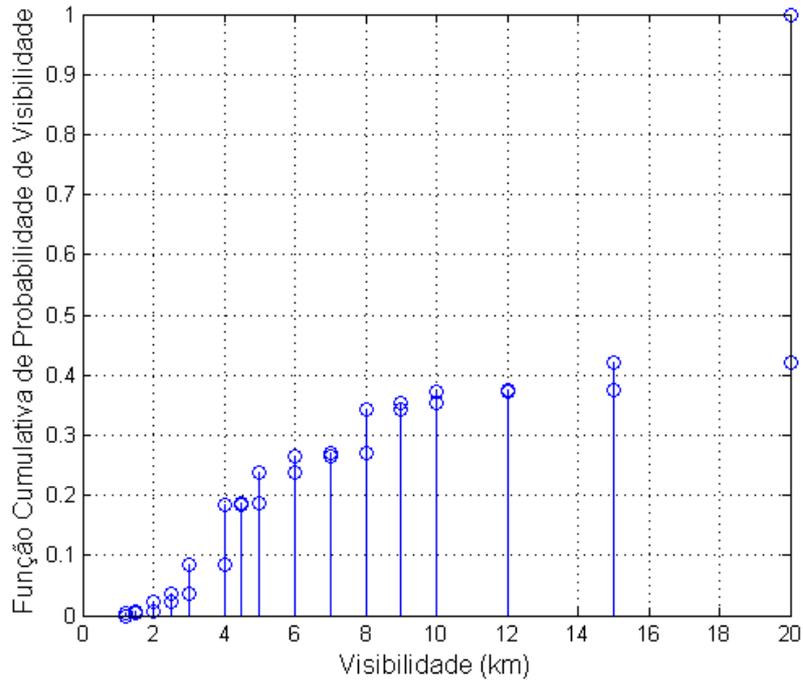


Figura A.2 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional dos Guararapes, em Recife – PE.

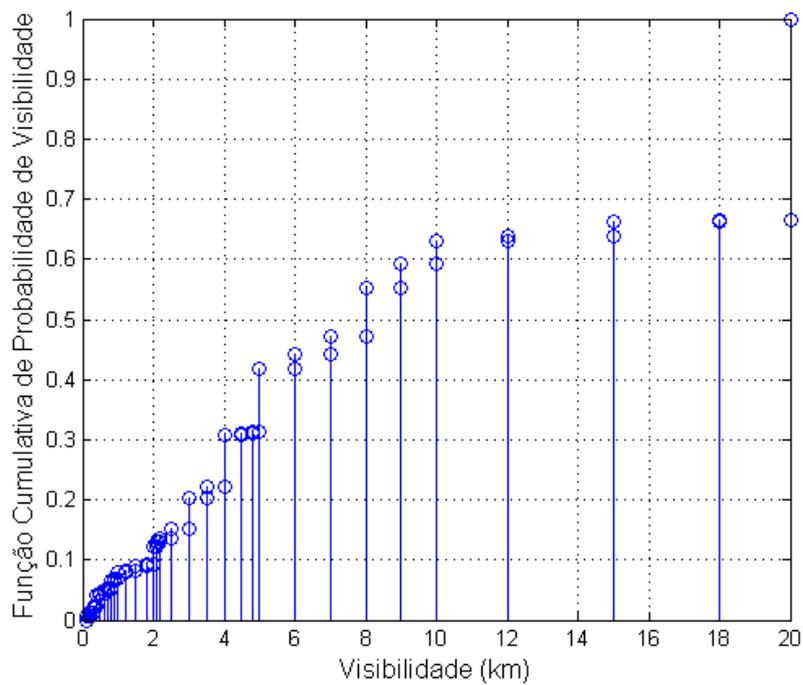


Figura A.3 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre – PA.

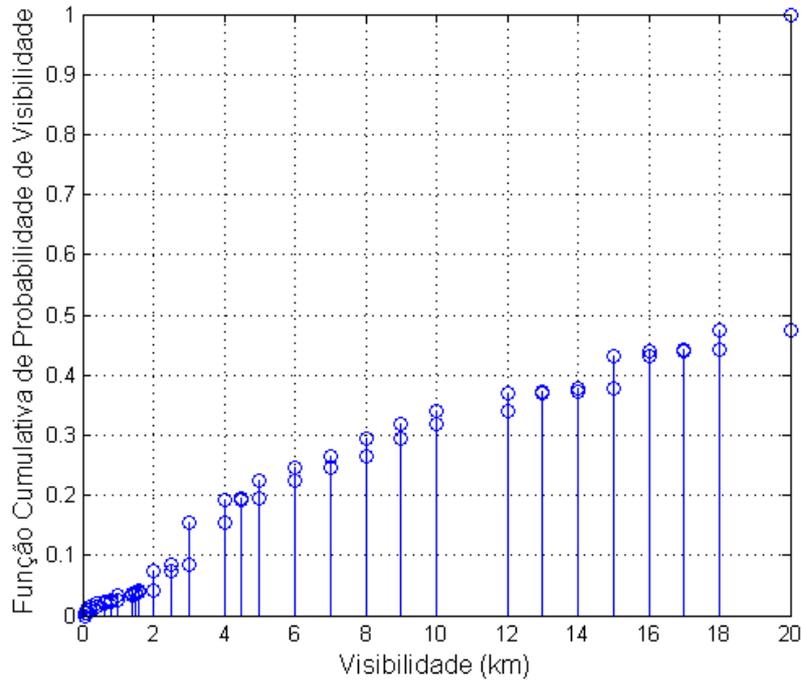


Figura A.4 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília – DF.

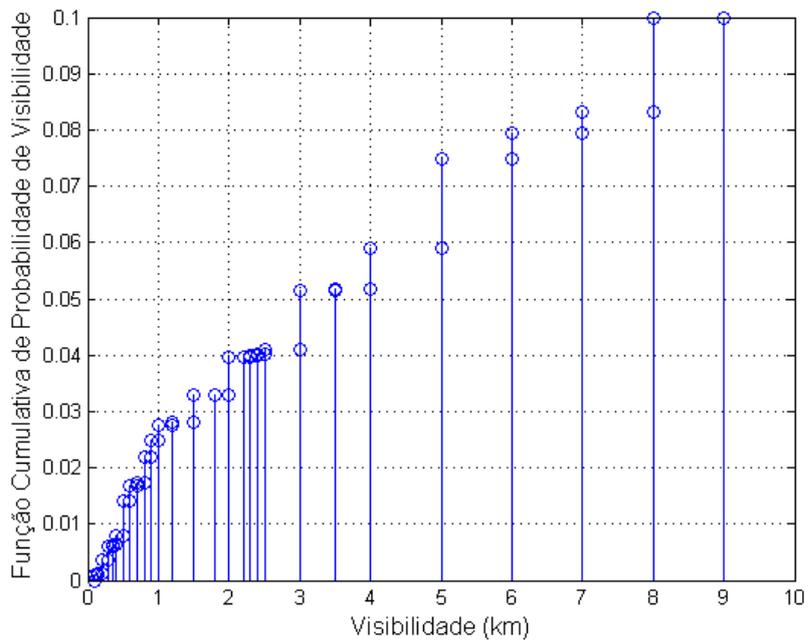


Figura A.5 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, em Manaus – AM.

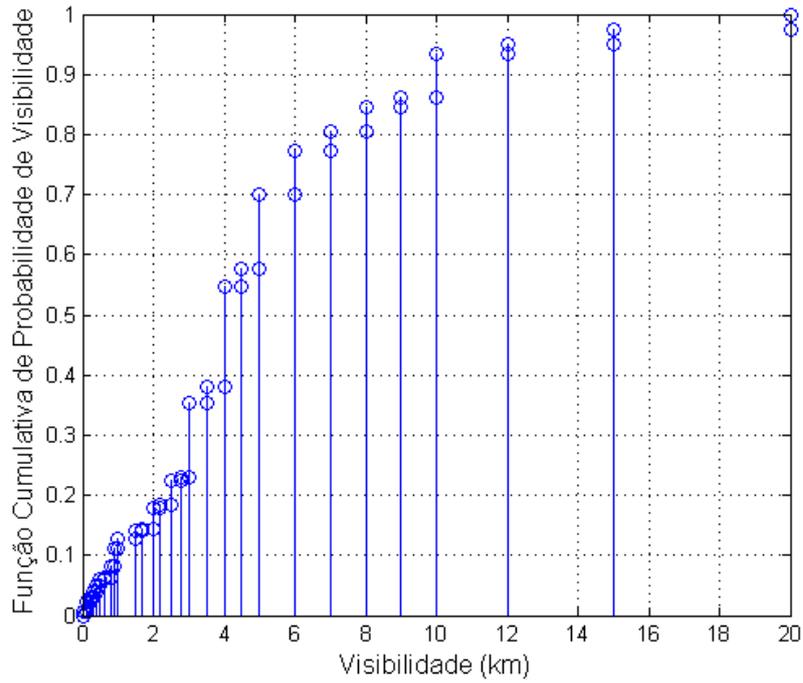


Figura A.6 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo – SP.

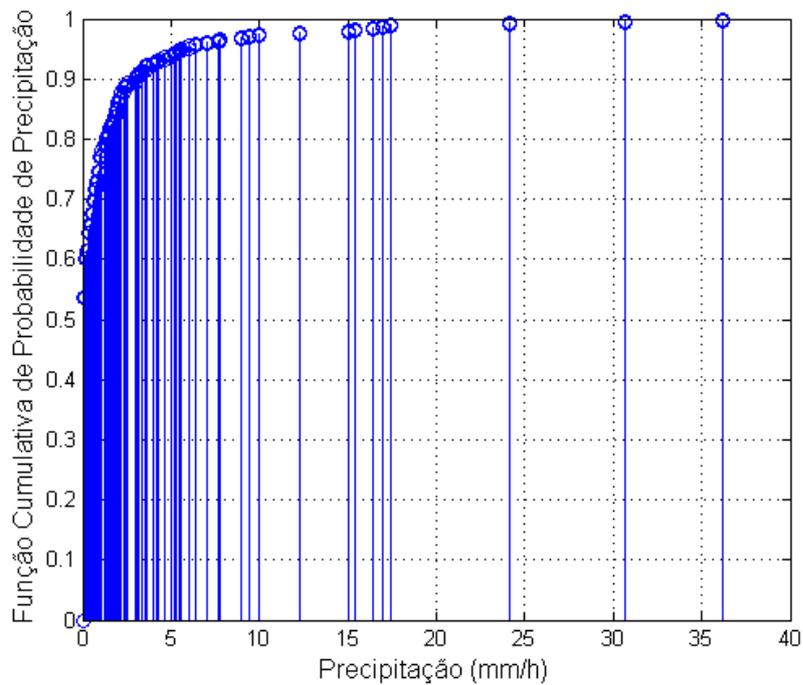


Figura A.7 – Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, em João Pessoa – PB.

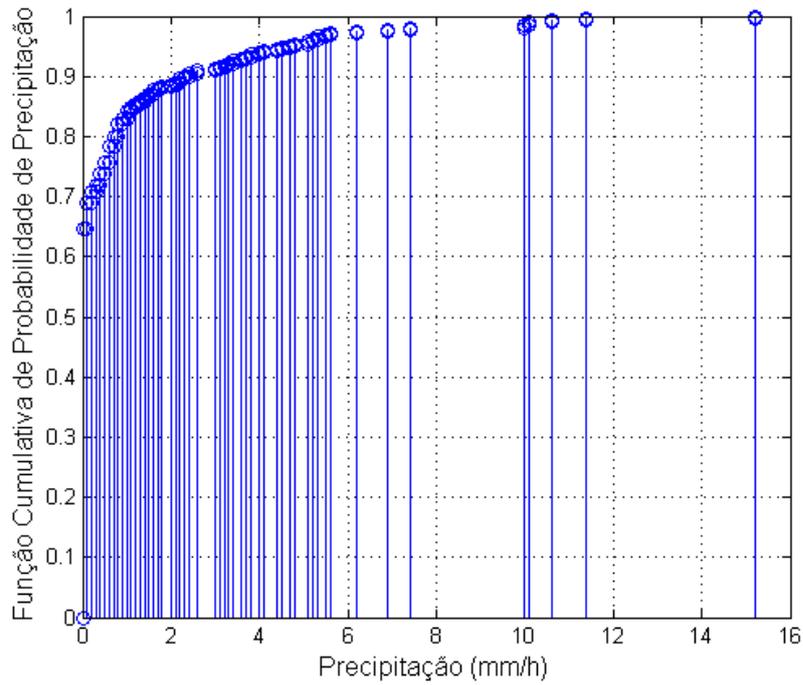


Figura A.8 – Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional dos Guararapes, em Recife – PE.

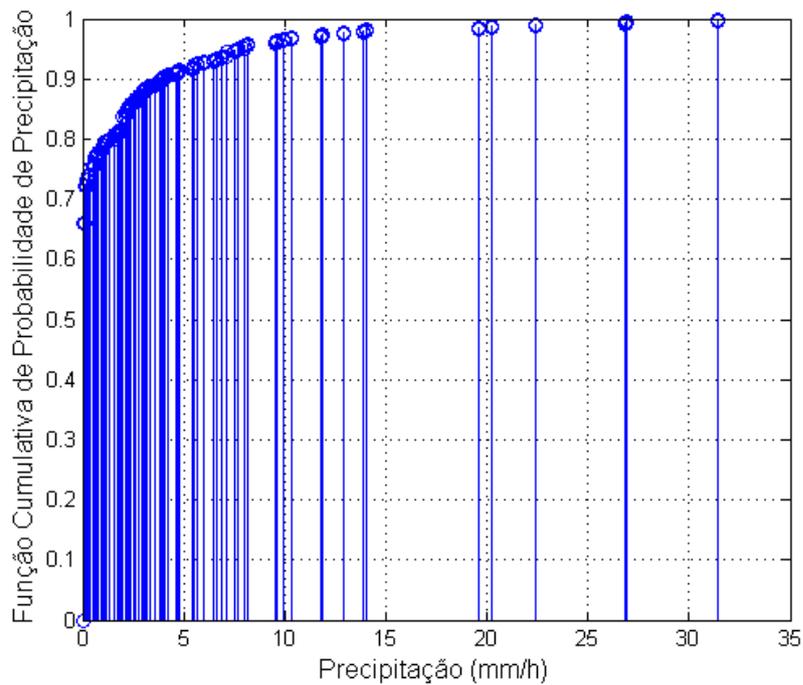


Figura A.9 – Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre – PA.

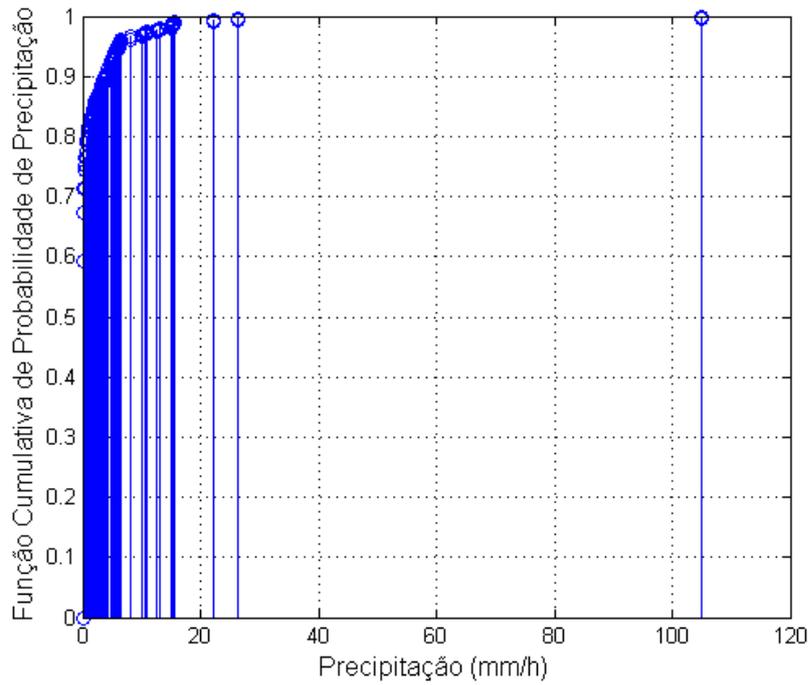


Figura A.10 – Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília – DF.

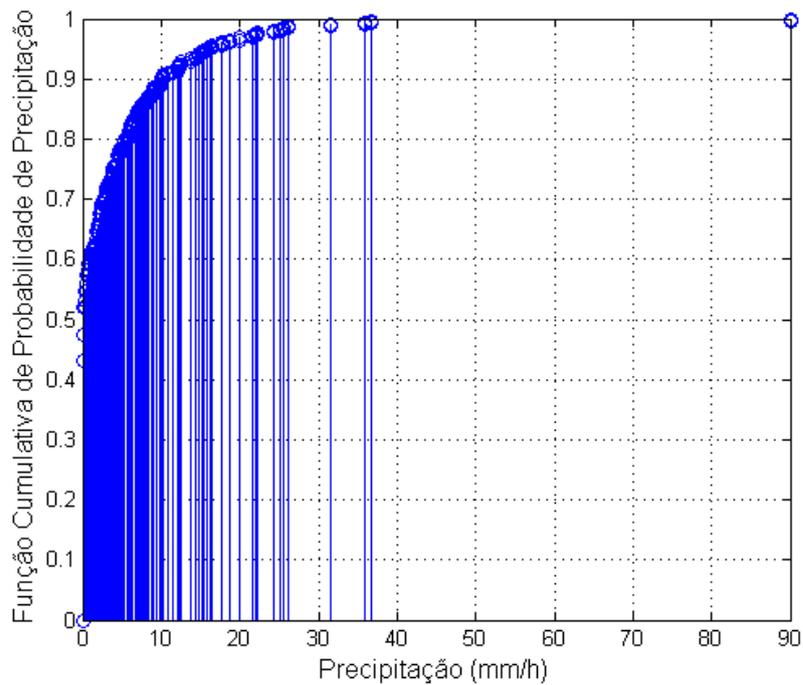


Figura A.11 – Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, em Manaus – AM.

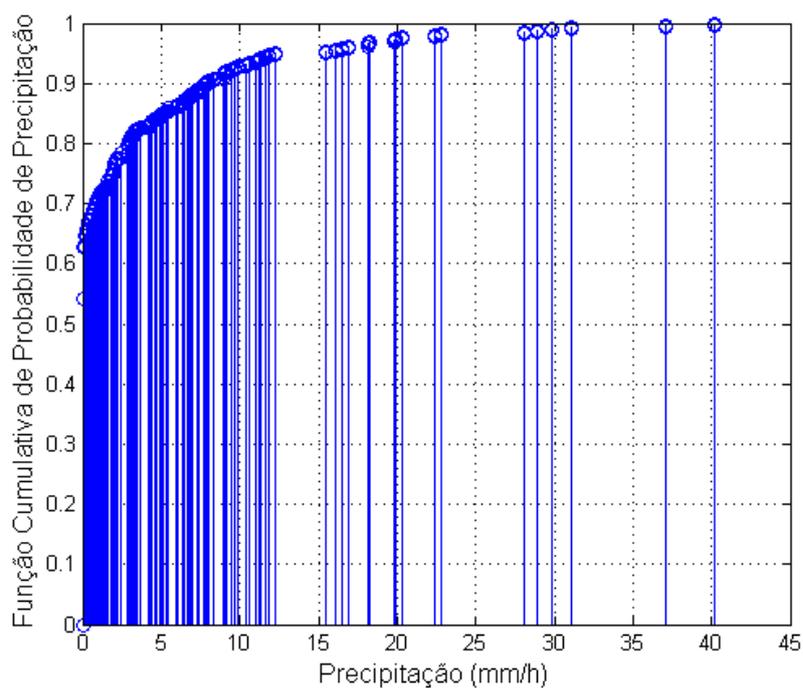


Figura A.12 – Função cumulativa de probabilidade de precipitação, sob as condições locais do Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo – SP.

Funções Cumulativas de Probabilidade de Visibilidade (Dados Horários em 2012) - Regiões de Interesse

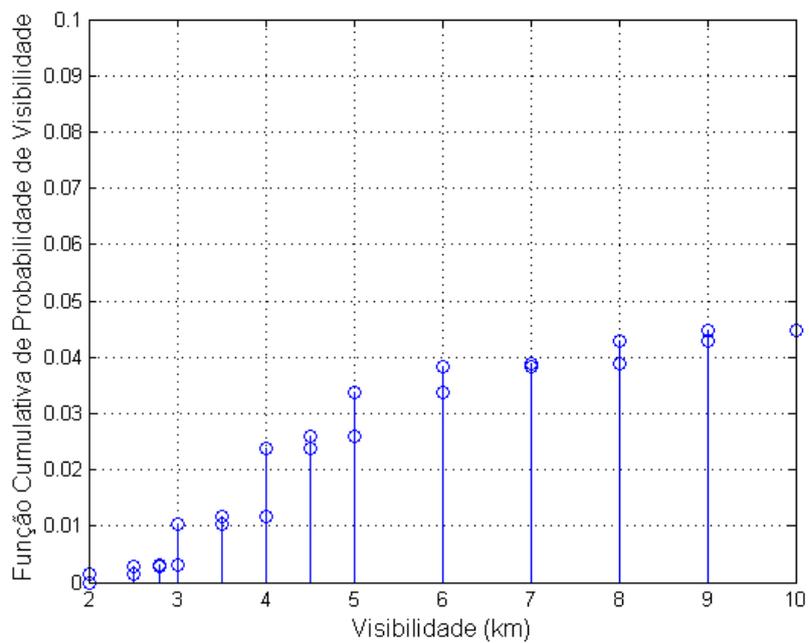


Figura B.1 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, em João Pessoa – PB.

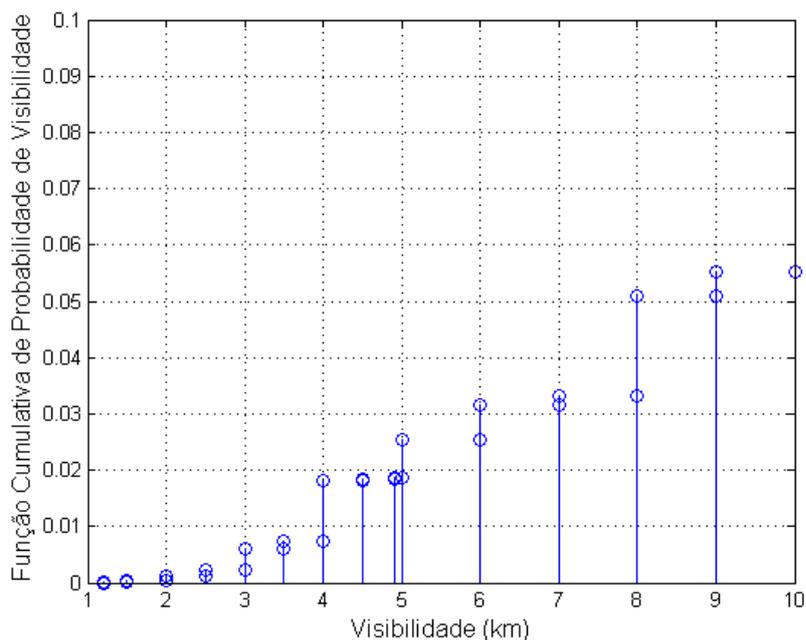


Figura B.2 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional dos Guararapes, em Recife – PE.

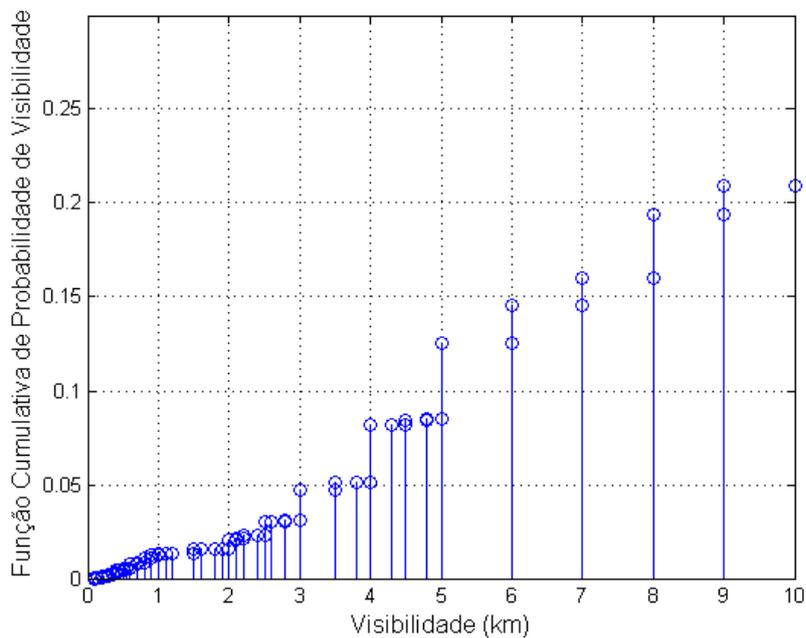


Figura B.3 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Salgado Filho, em Porto Alegre – PA.

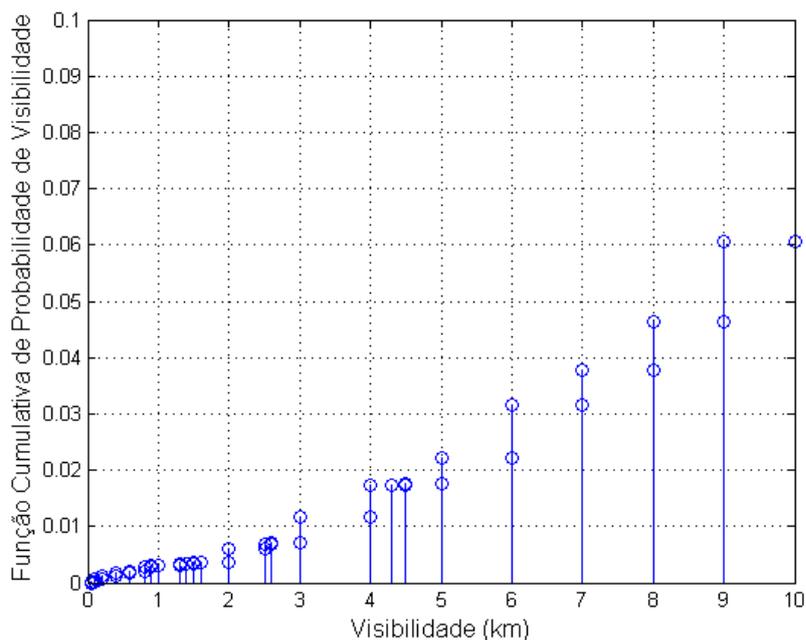


Figura B.4 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília – DF.

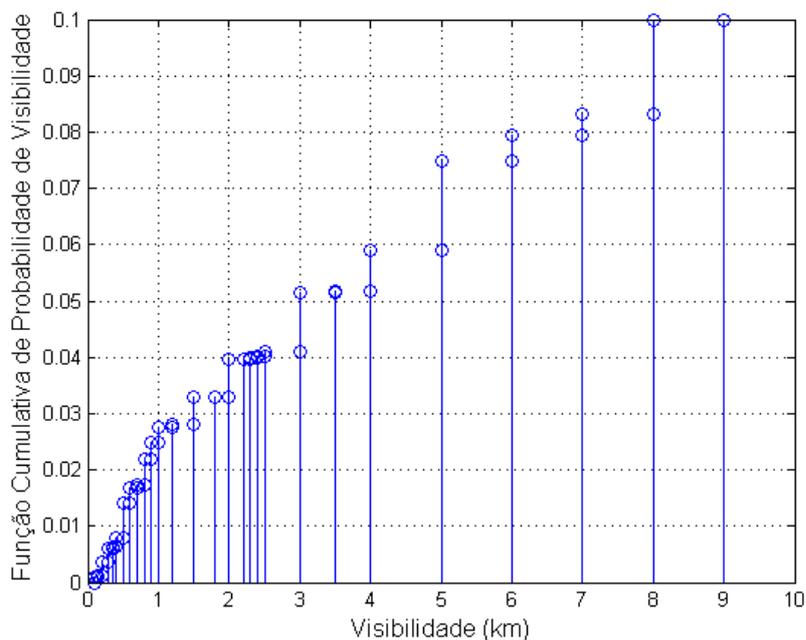


Figura B.5 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes, em Manaus – AM.

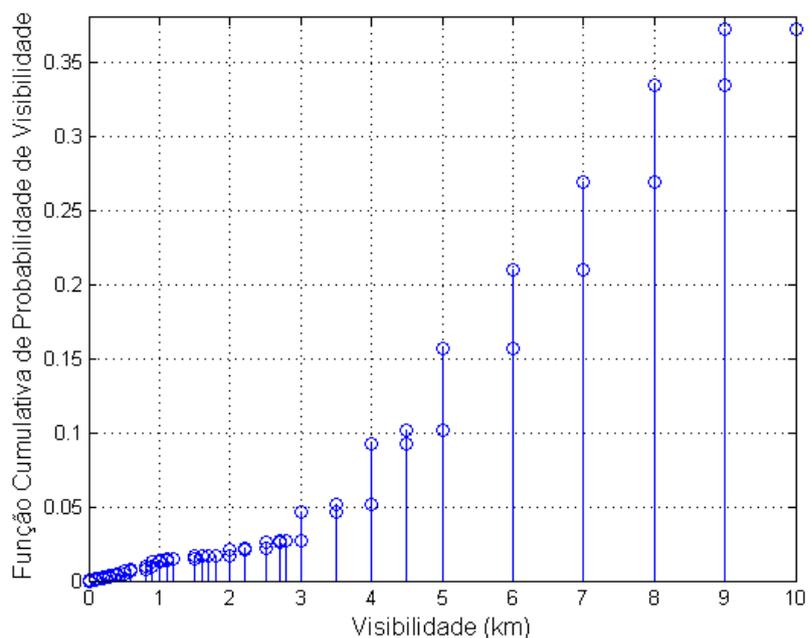


Figura B.6 – Função cumulativa de probabilidade de visibilidade, sob as condições locais do Aeroporto Internacional de Guarulhos, em São Paulo – SP.