

Efeitos da Neblina no Sistema  
de Comunicações Ópticas no  
Espaço Aberto.

Indira Almeida

Outubro/ 2017

**INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – INATEL**  
**MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES**

**Efeitos da Neblina no Sistema de Comunicações Ópticas no Espaço Aberto**

ÍNDIRA ALMEIDA

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

**ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ANTÔNIO JUSTINO RIBEIRO**  
**CO-ORIENTADORA: PROFA. DR. LÚCIA AKEMI MIYAZATO SAITO**

**SANTA RITA DO SAPUCAÍ – MG**

**2017**

Almeida, Indira Marília António de  
A447e Efeitos da Neblina no Sistema de Comunicações ópticas no Espaço Aberto. / Indira Marília António de Almeida. – Santa Rita do Sapucaí, 2017. 90p.

Orientadores: Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro; Prof. Dra. Lúcia Akemi Miyazato Saito.  
Trabalho de Conclusão de Curso – Mestrado – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

1. Sistemas ópticos no espaço aberto 2. Efeitos da neblina 3. Degradação do feixe óptico I. Ribeiro, José Antônio Justino. II. Saito, Lúcia Akemi Miyazato. III. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. IV. Título.

CDU 621.39

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 26/10/2017, pela comissão julgadora:

---

Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro  
INATEL (Orientador)

---

Profa. Dra. Lúcia Akemi Miyazato Saito  
MACKENZIE (Co-orientadora)

---

Prof. Dr. Mateus Augusto Faustino Chaib Junqueira  
UNIFEI

---

Prof. Dr. Carlos Nazareth Motta Marins  
INATEL

---

Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito  
Coordenador do Curso de Mestrado – INATEL

“Conheça todas as teorias,  
domine todas as técnicas,  
mas ao tocar uma alma humana,  
seja apenas outra alma humana.”

(C. G. Jung)

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pela sua graça abundante na minha vida e a oportunidade de chegar até aqui. Ao meu orientador, Prof.<sup>o</sup> José Antônio Justino Ribeiro, pela paciência, confiança, ensinamentos técnicos e humanos e, principalmente, por nunca permitir que eu desanimasse. À minha co-orientadora Prof.<sup>a</sup> Lúcia Akemi Miyazato Saito, do Centro de Pesquisa Mackgraphe da Universidade Mackenzie, por acreditar e abrir as portas para tornar tudo possível, pela confiança, paciência, pelo carinho, pelos ensinamentos e pela permanente disposição em me apoiar.

A toda minha família, em especial aos meus pais e aos meus avós, que sempre me apoiaram e compreenderam os meus objetivos me dando sempre muita força, carinho mesmo estando distantes. Ao meu namorado Pedro Ivo de Almeida Guimarães, por todo carinho, paciência e por todas as longas e inspiradoras conversas, que sempre me motivaram a prosseguir e nunca desistir quando a caminhada estava difícil. Sua motivação foi muito importante para conclusão deste trabalho. A todos meus professores do mestrado que passaram muito das suas experiências e a toda coordenação do Inatel pela ajuda em todos os sentidos.

Gostaria de destacar o apoio que recebi de todos os amigos do mestrado, em especial a Ana Cláudia, Eliet, Elvira, Monique Carleti, Natacha e Ramon que sempre me motivaram nas fases positivas e por todo auxílio nos momentos difíceis. Aos colegas do Centro de Pesquisa Mackgraphe da Universidade Mackenzie, em especial ao David, Eduardo, Rodrigo e Wanderson pelo apoio na conclusão desse trabalho. Agradeço ao professor Arismar coordenador do laboratório WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*) do Inatel que forneceu os conversores de mídia para o trabalho. Agradeço, ainda, a toda coordenação do Centro de Pesquisa no Mackgraphe que permitiu realizar todos os experimentos no laboratório de fotônica.

Um agradecimento muito especial ao Ministro José Carvalho da Rocha, do Ministério das Telecomunicações e Tecnologia de Informação (MTTI) de Angola pelo incondicional apoio financeiro em todas as etapas de minha formação.

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Breve Histórico	1
1.2 Motivação para o trabalho	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS DAS COMUNICAÇÕES ÓPTICAS NO ESPAÇO ABERTO</b>	<b>6</b>
2.1 Introdução	6
2.2 Descrição do sistema óptico sem fio	8
2.3 Principais fontes ópticas	9
(a) Características gerais	9
(b) Diodos laseres com cavidade de Fabry-Perot (FP)	11
(c) Diodos laseres de realimentação distribuída	11
(d) Diodos laseres de cavidade vertical e emissão de superfície	12
2.4 Principais fotodetectores	13
(a) Especificações gerais	13
(b) Fotodiodos p-i-n	14

(c) Fotodiodos de avalanche	14
2.4 Comentários sobre o capítulo	16
<b>CAPÍTULO 3 – CARACTERÍSTICA DE PROPAGAÇÃO ÓPTICA NO MEIO ILIMITADO</b>	<b>17</b>
3.1 Propagação das ondas eletromagnéticas em espaço aberto	17
(a) Equações de Maxwell	17
(b) Equação de onda para campos harmônicos no tempo	18
3.2 Espectro eletromagnético	19
3.3 Propagação do feixe óptico	21
(a) Distribuição transversal do feixe óptico	21
(b) Feixe óptico progressivo	22
(c) Divergência de um feixe	23
(d) Expansores de feixe	24
3.4 Atenuação geométrica	27
3.5 Característica das lentes ópticas	30
(a) Necessidade e especificação de lentes	30
(b) Perdas de potência nas lentes	31
3.6 Comentários sobre o capítulo	32
<b>CAPÍTULO 4 – DEGRADAÇÃO DO FEIXE ÓPTICO NO ESPAÇO ABERTO</b>	<b>33</b>
4.1 Descrição geral da atenuação atmosférica	33
(a) Causas da atenuação	33
4.2 Absorção atmosférica	34
(a) Fatores que influenciam na absorção	34
(b) Descrição do fenômeno	35
4.3 Espalhamento atmosférico	36
(a) Descrição geral	36
(b) O Espalhamento de Rayleigh	37
(c) O espalhamento de Mie	37
(d) O espalhamento geométrico ou não-seletivo	38
4.4 Efeitos da neblina	38



4.5	Atenuação por chuva	47
4.6	Efeitos da turbulência atmosférica	49
4.7	Balanço de potência	53
4.8	Dispersão e suas consequências	53
4.9	Comentários sobre o capítulo	54
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>		<b>55</b>
5.1	Introdução	55
5.2	Montagem do enlace na bancada	55
5.3	Análise dos resultados	58
	(a) Avaliação das perdas na neblina	58
	(b) Efeitos da neblina na duração de pulsos ultracurtos	60
	(c) Análise do diagrama de olho no sistema	62
5.4	Comentários sobre o capítulo	63
<b>CAPÍTULO 6 – COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES</b>		<b>64</b>
6.1	Comentários gerais	64
6.2	Conclusões	65
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	66
<b>Anexo A TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS REFERENTES À DISSERTAÇÃO</b>		<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>68</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1	Transmissão e recepção com o fotofone inventado pelo escocês Alexandre Graham Bell.	1
Figura 1.2	Comunicação óptica entre satélites em localização acima da atmosfera.	3
Figura 2.1	Esquema de um enlace de comunicações ópticas em ambiente aberto, com apresentação de algumas partes relevantes no processo.	9
Figura 2.2	Diagrama em blocos de um transceptor óptico. PRD - processamento de dados; LD - diodo laser; SAC - sistema de acoplamento; FOT – feixe óptico transmitido; FOR – feixe óptico recebido; PD – fotodetector; LA-lente de alinhamento.	9
Figura 2.3	Estrutura básica de um diodo laser com cavidade de Fabry-Perot.	11
Figura 2.4	Representação de um diodo laser com realimentação distribuída.	12
Figura 2.5	Representação de um diodo laser de cavidade vertical e emissão de superfície.	13
Figura 2.6	Princípio de funcionamento de um fotodiodo p-i-n.	14
Figura 2.7	Estrutura interna de um fotodiodo avalanche (APD).	15
Figura 3.1	Indicação de algumas faixas de frequência do espectro eletromagnético, situando a faixa de infravermelho, ocupada em parte por sistemas de comunicações ópticas.	20
Figura 3.2	(a) Distribuição aproximada de um feixe óptico empregado em comunicações. (b) Intensidade óptica ao longo da direção radial do feixe.	21
Figura 3.3	Variação do feixe de laser ao longo do percurso de propagação, com a identificação de alguns valores para a sua descrição.	23
Figura 3.4	Comportamento do raio do feixe para um diâmetro ótimo a distância específica de 100m.	24
Figura 3.5	Representação de um expansor de feixe utilizando duas lentes com diâmetros e pontos focais ajustados conforme o diâmetro final desejado.	25
Figura 3.6	Expansores de feixe com lentes na posição incorreta. (a) Situação em que resulta pouco aproveitamento da lente de saída, (b) Aumento da perda de potência na recepção.	26
Figura 3.7	Expansor de feixe com lentes propriamente casadas e detalhamento dos ângulos de divergência.	27
Figura 3.8	Variáveis envolvidas no cálculo da atenuação geométrica do enlace óptico.	27
Figura 3.9	Comportamento da atenuação geométrica em função do comprimento do enlace.	29

Figura 3.10	Comportamento da atenuação geométrica em função do comprimento do enlace para diferentes valores do diâmetro do receptor.	29
Figura 3.11	Esquema representativo do comportamento óptico de uma lente convergente.	30
Figura 4.1	Transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda, destacando as principais causas da atenuação.	36
Figura 4.2	Transmitância em função da visibilidade nos comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm.	40
Figura 4.3	Variação do fator de atenuação em função da visibilidade para vários comprimentos de onda.	41
Figura 4.4	Comportamento do fator de atenuação em função do comprimento de onda com visibilidade de 500m e 1km. (a) Variação do fator de atenuação para a visibilidade de 500m, (b) Variação do fator de atenuação com visibilidade de 1km.	42
Figura 4.5	Distribuição do tamanho das partículas com diversos parâmetros. (a) neblina de advecção densa, (b) neblina de radiação moderada.	44
Figura 4.6	Comportamento da atenuação. (a) variação da atenuação com relação à umidade relativa, (b) Variação da atenuação em função da temperatura.	46
Figura 4.7	Comportamento da atenuação da chuva em função da precipitação.	49
Figura 4.8	Variação do parâmetro estrutural do índice de refração medido no Rio de Janeiro no dia 16 de fevereiro de 2003.	51
Figura 4.9	Comportamento da atenuação devido à cintilação para os comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm em função da distância.	51
Figura 4.10	Variação da atenuação devido ao deslocamento aleatório do feixe em função da distância nos comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm.	52
Figura 5.1	(a) Diagrama em bloco do sistema FSO. (b) Disposição dos vários componentes do sistema montado na bancada.	56
Figura 5.2	Troca de informação entre dois computadores através do espaço aberto utilizando conversores de mídia.	58
Figura 5.3	Canal atmosférico sem neblina em 70% e com neblina em 90% de umidade relativa.	59
Figura 5.4	Relação entre a atenuação em 532nm e 1550nm e a umidade relativa sob condições de neblina.	60
Figura 5.5	(a) Duração do pulso na entrada e saída do enlace FSO sem neblina. (b) Duração do pulso com neblina.	61
Figura 5.6	Esquema em bloco da ilustração da geração do diagrama de olho.	62
Figura 5.7	Diagrama de olho na saída do sistema sem neblina. (b) Diagrama com neblina, em condição de 90% de umidade relativa.	63

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Características típicas de fotodiodos PIN e APD à base de Si, Ge e InGaAs.	16
Tabela 4.1	Partículas responsáveis pelo espelhamento do feixe óptico na atmosfera.	37
Tabela 4.2	Distribuição do tamanho das partículas.	44
Tabela 4.3	Valores dos coeficientes da umidade relativa e da temperatura.	46
Tabela 4.4	Código internacional de visibilidade para as condições do tempo e precipitação.	48

## Lista de Abreviaturas e Siglas

APD	<i>Avalanche Photodiode</i> – Fotodiodo de Avalanche.
BER	<i>Bit Error Rate</i> – Taxa de Erro de Bits.
CM	Conversor de Mídia.
DFB	<i>Distributed Feedback</i> – Realimentação Distribuída.
EDFL	<i>Erbium-Doped Fiber Laser</i> – Laser a Fibra Dopada com Érbio.
FOR	Feixe Óptico Recebido.
FOT	Feixe Óptico Transmitido.
FP	<i>Fabry-Perot</i> .
FSO	<i>Free Space Optics</i> – óptica no espaço aberto.
LA	Lente de Alinhamento.
LAN	<i>Local Area Network</i> – Rede de Área Local.
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> – Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação.
LD	Diodo laser.
LED	<i>light emitting diode</i> – Diodo Emissor de Luz.
MAN	<i>Metropolitan Area Networks</i> – Rede de Área Metropolitana.
MOR	<i>Range Meteorological Optical</i> – Alcance Óptico Meteorológico.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – Administração Nacional da Aeronáutica e espaço.
PD	Fotodetector.
PPD	<i>Pin Photodiode</i> – Fotodiodo do tipo PIN.
PRD	Processamento de Dados.
RF	Radiofrequência.
SAC	Sistema de Acoplamento.
VCSEL	<i>Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser</i> – Emissão de Superfície com Cavidade Vertical.
WAN	<i>Wide Area Networks</i> – Rede de longa distância.
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> – Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda.
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> – Organização Meteorológica Mundial.

## Lista de Símbolos

$A_{Atm}$	Atenuação atmosférica.
$A_{ch}$	Atenuação da chuva.
$A_{Cint}$	Atenuação por cintilação.
$A_{Desalin}$	Perda por desalinhamento imperfeito.
$A_{geo}$	Atenuação geométrica.
$A_{Rx}$	Perdas no receptor.
$A_t$	Perdas na transmissão.
$A_{Tx}$	Atenuação total.
$a$	Parâmetro de distribuição do tamanho das partículas.
$b$	Indução magnética.
$c$	Velocidade da luz.
$c_n$	Parâmetro da estrutura do índice de refração.
$CO_2$	Dióxido de Carbono.
$d$	Deslocamento elétrico.
$d_{er}$	Diâmetro no local em que ocorrerá a recepção.
$d_{tx}$	Diâmetro feixe no local da transmissão.
$D_0$	Diâmetro do feixe expandido.
$D_i$	Diâmetro do feixe não expandido.
$e$	Campo elétrico.
$f_1$	Distância focal da lente de entrada.
$f_2$	Distância focal da lente de saída.
$Ge$	Germânio.
$h$	Campo magnético.

$H_2O$	Símbolo químico da água.
$I_0$	Intensidade de radiação incidente.
$I$	Intensidade de irradiação.
InGaAs	Arsenieto de gálio e índio.
$j$	Densidade de corrente.
$k$	Número de onda.
$M_S$	Margem de segurança.
$n(r)$	Número de partículas.
$N$	Índice de refração.
$O_2$	Oxigênio.
$O_3$	Ozônio.
$P_{Rx}$	Potências de recepção.
$P_{Tx}$	Potências de transmissão.
$q$	Parâmetro do tamanho das partículas na atmosfera.
$Q$	(Fator- $Q$ ).
$r$	Distância radial.
$r_{tx}$	Raio do feixe no local da transmissão.
$R$	Distância radial até o local da recepção.
$R_1$	Raio de curvatura da face.
$R_2$	Raio de curvatura da face.
$R_p$	Taxa de precipitação.
$R(z)$	Raio de curvatura.
Si	Silício.
$S(0)$	Densidade de potência óptica em uma distância de referência.
$S(R)$	Densidade de potência óptica a uma distância $R$ a contar da referência.
$T(R)$	Transmitância.
$V$	Visibilidade.
$W(z)$	Raio do feixe.

$x_0$	Parâmetro de tamanho.
$\alpha$	Fator de atenuação.
$\alpha_a$	Coefficientes de absorção por aerossóis.
$\alpha_{adv}$	Fatores de atenuação da neblina originada por advecção.
$\alpha_c$	Coefficientes de absorção por moléculas.
$\alpha_m$	Coefficientes de espalhamento por aerossóis.
$\alpha_p$	Coefficiente de extinção ou fator de absorção.
$\alpha_{rad}$	Fatores de atenuação da neblina originada por radiação.
$\alpha_s$	Coefficientes de espalhamento por moléculas.
$\beta$	Fator de fase.
$\gamma$	Fator de propagação.
$\Gamma_p$	Coefficiente de reflexão de potência.
$\varepsilon$	Permissividade elétrica.
$\theta$	Ângulo de divergência do feixe.
$\lambda$	Comprimento de onda.
$\lambda_o$	Comprimento de onda do feixe óptico relacionado à frequência angular.
$\mu$	Permeabilidade magnética.
$\rho$	Densidade volumétrica.
$\sigma$	Condutividade do meio.
$\sigma_l^2$	Variância de Rytov.
$\sigma_r^2$	Variância radial de potência.
$\omega$	Frequência angular.



## Resumo

ALMEIDA, I. Efeitos da Neblina nos Sistemas de Comunicações Ópticas no Espaço Aberto. Santa Rita do Sapucaí, 2017. Instituto Nacional de Telecomunicações.

O sistema de comunicações ópticas no espaço aberto (FSO, *free space optics*) caracteriza-se pela transmissão de informação tendo feixes ópticos como onda portadora propagando-se na atmosfera. Trata-se de uma tecnologia promissora para redes de banda larga sem fio e uma alternativa a ser utilizada em conjunto com os sistemas tradicionais de radiofrequência (RF) e os que empregam fibras ópticas. O desempenho dessa tecnologia é dependente das condições do meio de propagação, incluindo fatores climáticos como, por exemplo, a neblina, gotas de água e partículas de aerossóis em suspensão. Esses fatores agem como causas de absorção e espalhamento, levando à degradação do feixe óptico modulado. Este trabalho apresenta os conceitos e limitações do sistema FSO, com uma análise teórica e avaliação experimental de um enlace óptico sob a influência da neblina. Nos ensaios, foram utilizados dois comprimentos de onda, um na faixa visível de 532nm e outro no infravermelho próximo de 1550nm, coincidente com sistemas de comunicações a fibras ópticas. Nestes comprimentos de onda, obtiveram-se as atenuações na neblina para diferentes graus de umidade. Analisou-se a dispersão temporal da duração de pulsos ultracurtos no enlace, sem neblina e com neblina, na condição de 90% de umidade. Utilizou-se o diagrama de olho na análise do desempenho do enlace e determinou-se a taxa de erro de bit (BER, *bit error rate*) pelo fator que mede a qualidade do olho ( $Q$ ). O valor da BER na neblina mostrou-se aceitável para a transmissão de dados em certos limites de alcance, obedecendo ao limite do código de correção de erro (FEC, *forward error correction*).

Palavras-chave: Sistemas ópticos no espaço aberto, efeitos da neblina, degradação do feixe óptico.

## Abstract

ALMEIDA, I. M. A. Efeitos da Neblina nos Sistemas de Comunicações Ópticas no Espaço Aberto. Santa Rita do Sapucaí, 2017. Instituto Nacional de Telecomunicações.

Free space optics (FSO) communication systems are characterized by the transmission of information applying optical propagation through the atmosphere. It is a promising technology for wireless broadband networks and an alternative to be used in conjunction with radiofrequency (RF) and optical fiber systems. However, the performance of this technology is dependent on the conditions of the beam propagation medium. Atmospheric factors, such as fog, water droplets, dust concentration and aerosol particles, produce absorption and scattering causing a degradation in the optical link. This dissertation presents the concepts and limitations of FSO system. An optical link was evaluated with the transmission channel under the influence of the fog. Two wavelengths were used, one in the visible range 532nm and another in the near infrared 1550nm. Attenuations in the fog were obtained for different degrees of relative humidity at those wavelengths. It was analyzed the temporal dispersion ultrashort pulses and the effects on the eye diagram. In the analysis of the performance of the link it was obtained the bit error rate (BER) by the factor that measures the quality of the eye ( $Q$ ). The value of the BER in the fog showed that signal is acceptable for data transmission, although complying with the limit of forward error correction (FEC).

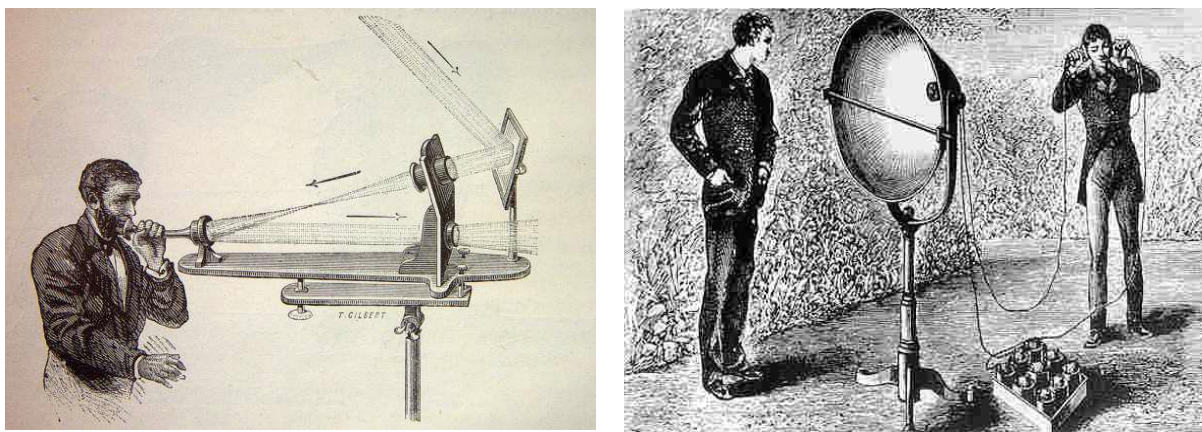
Keywords: Free space optics, fog effects, absorption and scattering degradation.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Breve histórico

As tentativas de emprego da luz através da atmosfera para envio de mensagens à distância iniciou-se na Grécia antiga. A proposta era usar feixes da luz solar refletidos em discos metálicos que possuíam superfícies muito polidas e obedecendo certo código elementar. Em 1792, o Francês Claude Chappe (1763-1805) desenvolveu um telégrafo óptico baseado em uma seqüência de semáforos. Essa invenção pode ser considerada como o primeiro sistema de comunicações digitais da história [1]. Em 1880, Alexandre Graham Bell (1847-1922) criou o *fotofone*, uma invenção que marcou o renascimento das comunicações ópticas sem fio. A idéia era transmitir voz pelo ar por meio da modulação da luz solar [2]. Esta modulação era feita através de um espelho que vibrava com a atuação mecânica da voz [2]. Na outra extremidade do enlace, empregava uma célula de um material fotossensível para identificar as variações na intensidade do feixe óptico recebido (Fig. 1.1).



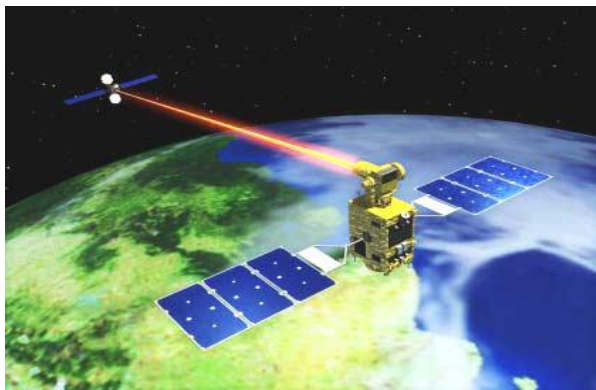
**Fig. 1.1.** Transmissão e recepção com o fotofone inventado pelo escocês Alexandre Graham Bell [3].

Em 1960, iniciaram-se a fabricação e aplicações do primeiro *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) de rubi, desenvolvido por Theodore Maiman (1927-2007). Posteriormente (1962), com o desenvolvimento do *diodo laser* (LD, *laser diode*), a tecnologia de comunicações ópticas no espaço aberto (FSO, *free-space optics*) passou a ser investigada como um importante processo de comunicações sem fio de banda larga. Um de seus objetivos era o uso em redes que exigissem elevadas taxas de transmissão [4]. A comunicação empregando um feixe modulado foi uma das primeiras aplicações utilizando o diodo laser. No entanto, o meio físico disponível (fibra óptica) não correspondia às expectativas, apresentando elevadíssima atenuação e grande dispersão do feixe óptico guiado. Com o tempo, criaram-se as fibras ópticas de baixas perdas, juntamente a diversos componentes e dispositivos que garantissem a qualidade da transmissão.

Em 1964, o Dr. Erhard Kube começou seus estudos na transmissão de luz através da atmosfera e em 1968 publicou um artigo em que estudava o envio de informação por um feixe de luz na atmosfera [5]. Os primeiros experimentos utilizando laser foram realizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a fim de utilizá-lo como um meio de comunicação dentro de uma cápsula espacial [6][7]. As pesquisas de propagação de feixe laser na atmosfera inicialmente foram focalizadas em aplicações militares. Buscavam seu emprego em sistemas de apontamento, localização de alvos, medição de distância, guiamento de mísseis, e outras. Em seguida, vieram aplicações civis em sensoriamento remoto da atmosfera e comunicações ópticas no espaço aberto.

A terminologia *comunicação a laser no espaço aberto* surgiu de uma proposta de transmissão entre a terra e satélites orbitais ou para conexão de aviões com a terra. Uma das razões é que esse sistema utiliza uma portadora óptica na faixa de infravermelho e é capaz de transmitir informações com elevadíssimas taxas de dados. As primeiras tentativas não ocorreram como o esperado pela disponibilidade de lasers que emitiam pequenas potências [8][9]. Por estes motivos, comunicações ópticas no espaço aberto eram mais convenientes para a conexão entre satélites, considerando a quase ausência de atmosfera. Nessa região, a comunicação FSO não sofre espalhamentos por causa de moléculas do meio e, pela mesma razão, não ocorre à redução da densidade de potência do feixe causada por absorção. Um dos problemas mais críticos refere-se ao aumento gradual na abertura do feixe, com a conseqüente redução na densidade de potência que alcança o receptor. A Figura 1.2 ilustra o experimento feito pela NASA utili-

zando o laser para comunicação, transmitindo informações entre *Goddard Space Flight Center* e a cápsula espacial em órbita *Gemini-7* [9].



**Fig. 1.2.** Comunicação óptica entre satélites em localização acima da atmosfera.

Em 1987, foi desenvolvido o amplificador a fibra dopada com érbio, umas das contribuições para o avanço das telecomunicações ópticas. Com este amplificador foi possível implementar enlaces submarinos empregando cabos ópticos e outros enlaces de longa distância com altas taxas de transmissão. A partir da década de 1990, o aumento da demanda por operações em faixas cada vez maiores e a necessidade de sistemas mais robustos, como os que se associam à rede mundial de computadores, fez com que o sistema de comunicação óptica no espaço aberto, passasse a ser mais desenvolvido e explorado. Sua utilização foi estimulada em função de vantagens que apresenta em relação aos sistemas cabeados empregando fibras ópticas [10][11]. Em particular, passou a ser de grande interesse para enlaces de curtas distâncias e de baixo custo. Ficaram adequados para extensões de até alguns quilômetros, como em redes locais ou metropolitanas, em redes de acesso de último quilômetro, conexão entre extremidades de sistemas cabeados para os quais haja dificuldades de instalação.

## 1.2 Motivação para o trabalho

Nas últimas décadas, houve grande evolução do tráfego de dados pelas redes de telecomunicações. As aplicações que requeiram grandes larguras de banda estão sempre crescendo, demandando ampliações sucessivas nos limites de largura de faixa. Buscaram-se métodos que satisfizessem estas exigências em diferentes sistemas, como as comunicações sem fio, baseadas em radiofrequência, e sistemas cabeados utilizando toda a tecnologia associada às fibras ópticas [12]. Apesar de transmitir informações que ocupem grandes larguras de faixa, as comunicações por fibra óptica pode ter custos elevados, particularmente se aplicada às redes de

acesso em ambiente metropolitano no qual haja grande concentração de usuários. Justifica-se esta afirmação com base nas implicações relativas aos direitos de passagem, lançamentos de ductos e as freqüentes necessidades de perfurações para instalação dos cabos. Por outro lado, sistemas de radiofreqüência e microondas, com intensa utilização nas grandes metrópoles, apresentam dificuldades. Destacam-se a grande probabilidade de interferências em freqüências de livre utilização e o alto custo das licenças de uso de parte do espectro eletromagnético.

A comunicação óptica em espaço aberto estabelece-se como uma alternativa para conexões de grandes larguras de faixa [13][14] e enlaces de curtas distâncias. A sua capacidade de grande largura de banda é um forte incentivo ao seu uso, associado, ainda à sua flexibilidade e facilidade de instalação. Apresenta vantagens como a imunidade a interferências eletromagnéticas, não é sujeita à regulamentações por entidades governamentais e garante segurança para as informações transmitidas por causa da dificuldade de interceptação do sinal óptico concentrado em um feixe estreito. Sua rápida implementação, a facilidade para estabelecer enlaces temporários, a possibilidade de permitir elevadas taxas de dados com baixo custo e consumo limitado de energia são outras características importantes. Para comparação, seu custo de instalação é mais viável do que sistemas de radiofreqüência que, somado à necessidade de licença para sua instalação e operação, ocupa grande espaço e consome maior quantidade de energia.

Estas características mostram que a tecnologia FSO pode ser aplicada às redes de áreas metropolitanas (MANs, *metropolitan area networks*), em redes locais (LANs, *local area network*) e em redes principais e militares, condicionadas aos enlaces de curtas distâncias. Seu projeto e instalação exigem certos cuidados, tendo em vista determinadas propriedades que afetam o feixe óptico transmitido. Por exemplo, a transmissão em espaço aberto está sujeita às mudanças no ambiente de propagação, principalmente ao se avaliar as características dinâmicas da atmosfera sobre o desempenho do enlace óptico. A necessidade da compreensão dos diferentes fenômenos que envolvem essa propagação e a busca por uma avaliação confiável do sistema estimularam o interesse pela análise dos efeitos da neblina, uma das alterações relevantes da atmosfera que comprometem esse tipo de comunicação.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos das comunicações ópticas no espaço aberto, suas aplicações e recursos que as tornam mais viáveis em comparação com as comunicações sem

fio tradicionais. Descrevem-se os conceitos básicos do sistema FSO, as principais fontes ópticas e os fotodetectores para a recuperação da informação no lado do receptor. No Capítulo 3 estudam-se as ondas eletromagnéticas em espaço aberto, a partir da solução da equação de Helmholtz. Abordam-se formas de propagação do feixe óptico, a atenuação geométrica introduzida e as características de uma lente empregada para a sua colimação.

O Capítulo 4 aborda a degradação do feixe óptico no espaço aberto, incluindo a absorção de parte de sua energia, seu espelhamento, efeitos da turbulência atmosférica e de alguns tipos de neblina. No Capítulo 5 apresentam-se a construção de enlace FSO em bancada, os componentes utilizados em sua implementação, a descrição do meio de propagação utilizados nos ensaios e os principais resultados experimentais. O último capítulo é dedicado às conclusões, comentários e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Fundamentos das comunicações ópticas no espaço aberto

### 2.1 Introdução

Os sistemas em que o meio de transmissão é a fibra óptica têm sido muito utilizados e avaliados favoravelmente. Continua como alternativa para transmissões em grandes taxas de modulação, com valores superiores a 10Gb/s em distâncias de muitos quilômetros sem necessidade de repetidores. Incluem as tecnologias aplicadas em redes de longa distância (WAN -*wide area networks*), em redes metropolitanas (MAN - *metropolitan area networks*) e em redes locais (LAN -*local area network*). Apesar das vantagens nessas transmissões, a implementação de sistemas com fibras ópticas exige cuidados especiais e, em muitos casos, os custos são elevados em função do emprego e da instalação dos cabos necessários [10][15].

Para certas aplicações, existem transmissões em ambientes abertos, como pela atmosfera terrestre ou através da água do oceano. Aplicações de relevância referem-se aos enlaces de curtas distâncias, como em redes de acesso, redes locais e metropolitanas e outras aplicações nas quais prevalecem dificuldades na instalação de cabos ópticos. Nesta última condição, aparece a necessidade de desenvolvimento de um sistema que ofereça flexibilidade, rapidez para instalação e vantagens semelhantes aos sistemas tradicionais com fibras ópticas. Neste cenário, insere-se a proposta de comunicações ópticas pelo espaço aberto (FSO).

Nessas análises, há necessidade de um tratamento diferenciado em relação aos processos tradicionais. Alguns parâmetros de avaliação, como os que envolvem a degradação do feixe óptico modulado, são comuns aos diferentes ambientes de transmissão. Todavia, os sistemas ópticos em espaço aberto possuem características e valores próprios, fatores importantes na verificação do desempenho e da eficácia do enlace [13][16].



O sistema FSO é capaz de operar com taxas de transmissão superiores a 1Gb/s e pode ser utilizado para transmissão de voz, dados e vídeo. Entre suas vantagens mais significativas, não requer licenciamento do espectro, como nas comunicações de radiofrequência (RF), permite a transmissão em grandes larguras de faixa, da mesma ordem que os sistemas a fibra, tem grande facilidade de instalação e é imune às interferências eletromagnéticas. Tem possibilidades de instalação temporária, situação útil, por exemplo, na cobertura de eventos de curta duração. Por apresentar facilidade em implementação, pode ser uma alternativa em situações onde ocorra interrupção da comunicação por danos em cabos ópticos.

Um exemplo dramático de ampla divulgação ocorreu após o atentado ao *World Trade Center*, em 11 de setembro de 2001. A estrutura responsável pela comunicação local com o cabeamento óptico foi totalmente destruída, incluindo as redes principais. Várias empresas ficaram sem comunicação e, como alternativa rápida e eficiente, foi instalado o sistema FSO, restabelecendo-se as comunicações entre empresas, suas filiais e com outros terminais [2].

Deve-se atentar para os inconvenientes já mencionados que limitam suas aplicações. Em primeiro lugar, o feixe óptico está sujeito a vários mecanismos de atenuação na atmosfera, agravados pelas elevadas frequências empregadas como portadoras. Destacam-se a absorção da energia eletromagnética pelos gases da atmosfera, por partículas em suspensão, pelo vapor d'água e por outros elementos no ambiente. Considerando que o emissor não seja capaz de colimar o feixe de forma absoluta, prevê-se, também, uma perda por causa do seu espalhamento, fato que ocorre mesmo que o meio fosse o vácuo [17].

O desempenho do sistema é sensível às condições atmosféricas, como as que levam à formação de neblina, de nevoeiro e às turbulências, como o *efeito da cintilação* e o *deslocamento aleatório do feixe* [18], que contribuem para a atenuação do feixe óptico. O sistema FSO é influenciado por radiações vindas do espaço exterior, que se manifestam em forma de ruído, com maiores efeitos causados pelas emissões do sol [9]. Embora a maior intensidade solar ocorra em torno de 550nm, existem radiações em muitos comprimentos de onda, incluindo a faixa do infravermelho. Em comprimentos de onda de interesse para comunicações no espaço aberto (em torno de 1300nm ou 1550nm), a intensidade da radiação solar que chega à atmosfera é cerca de 20% do valor máximo na faixa de luz visível. Portanto, chegam ao fotodetector, simultaneamente, o feixe óptico desejado e esse tipo de ruído. Ambos os sinais influirão na

fotocorrente utilizada na recuperação da mensagem. Para diminuir os efeitos indesejáveis, empregam-se filtros ópticos nos receptores.

Uma das diferenças entre a transmissão no espaço aberto e na fibra óptica é a atenuação muito menor na fibra, comparada com a resultante na atmosfera. Fibras modernas de tipo monomodo, operando no comprimento de onda de 1550nm, chegam a atenuar entre 0,25dB/km e 0,5dB/km. A atenuação atmosférica no mesmo comprimento de onda é muito variável, dependendo das condições, e difícil de ser prevista com exatidão. Em ambiente sem neblina, sem nuvens, com baixa umidade e tendo outros fatores favoráveis pode ser tão baixa quanto 0,2 dB/km. Sob denso nevoeiro ou através de certos tipos de nuvens pode ultrapassar centenas de decibels por quilômetro [16].

Muitos sistemas comerciais utilizam os comprimentos de onda nas faixas de 780nm a 900nm e de 1550nm a 1600nm. Esta faixa é alternativa de custo mais elevado para a construção, implementação e instalação [13][16], porém conveniente pela sua compatibilidade com os sistemas ópticos cabeados. A janela de transmissão em torno de 1300nm, muito útil em sistemas a fibra óptica, não é muito empregada para FSO pelo fato de apresentar grande absorção atmosférica [10].

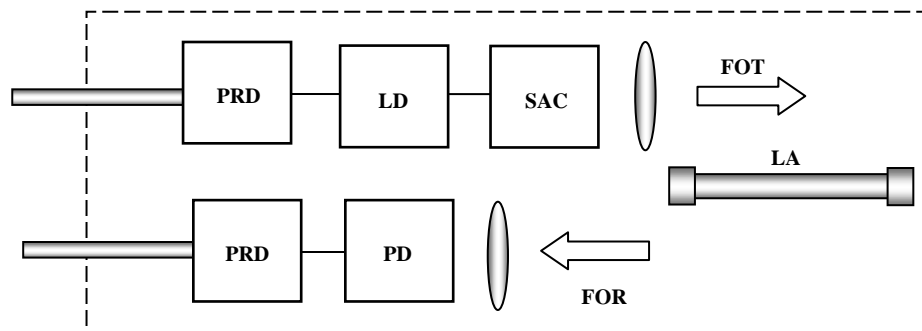
## 2.2 Descrição do sistema óptico sem fio

O FSO assemelha-se ao sistema de comunicação por radiofrequência em termos de processamento de dados, modulação, transmissão, recepção [13]. Em geral, são operações ponto-a-ponto compostas por transceptores ópticos alinhados em visada direta sem obstáculo ao longo do percurso. A Figura 2.1 ilustra um esquema de enlace de comunicações ópticas pelo espaço aberto. O transmissor é responsável por gerar o sinal óptico, introduzir a modulação e adaptar o feixe para a transmissão na atmosfera. É constituído por uma fonte óptica, geralmente um diodo laser (LD, *laser diode*) ou um diodo emissor de luz (LED, *light emitting diode*), por um conjunto de lentes para concentrar o feixe de luz, tornando-o mais adequado à propagação no meio. Essa focalização reduz a possibilidade de obstrução do feixe por objetos no ambiente de propagação e minimiza os efeitos de turbulência [19][20]. A modulação pode ser de forma direta, com o sinal da mensagem atuando na corrente da fonte óptica, ou externa, com uso de moduladores eletro-ópticos, como os que utilizam o interferômetro de Mach-Zehnder [21].



**Fig. 2.1.** Esquema de um enlace de comunicações ópticas em ambiente aberto, com apresentação de algumas partes relevantes no processo.

O receptor tem as funções de detectar o feixe óptico modulado, processar e recuperar o sinal elétrico. Utiliza um sistema de lentes, fotodetector e o circuito eletrônico para demodular o sinal recuperado no fotodetector. A lente capta a energia da onda incidente e concentra-a no conjunto de acoplamento ao fotodetector. A corrente foto gerada é proporcional à potência óptica incidente, garantindo que o sinal elétrico recuperado tenha mesmo formato do sinal de modulação recebido [22]. A representação de um transceptor óptico em um sistema FSO está na Figura 2.2.



**Fig. 2.2.** Diagrama em blocos de um transceptor óptico. PRD - processamento de dados; LD - diodo laser; SAC - sistema de acoplamento; FOT - feixe óptico transmitido; FOR - feixe óptico recebido; PD - fotodetector; LA - lente de alinhamento.

### 2.3 Principais fontes ópticas

**(a) Características gerais.** A escolha de uma fonte transmissora adequada às características do meio é importante em um projeto para enlaces ópticos. Essas fontes são semelhantes ou as mesmas utilizadas em sistemas com fibras ópticas, com atenção especial na escolha da potência, no comprimento de onda que depende da taxa de transmissão. Dependendo das exigências do projeto, podem ser utilizados os diodos emissores de luz (LEDs), com maiores larguras espectrais, ou os diodos lasers (LD), fontes mais coerentes e de pequeníssima largura espec-

tral [21][23]. Ambos os tipos são construídos com formas especiais de junções semicondutoras que empregam materiais de banda proibida direta [20][21]. Essas junções permitem a emissão de luz sob certas condições de polarização.

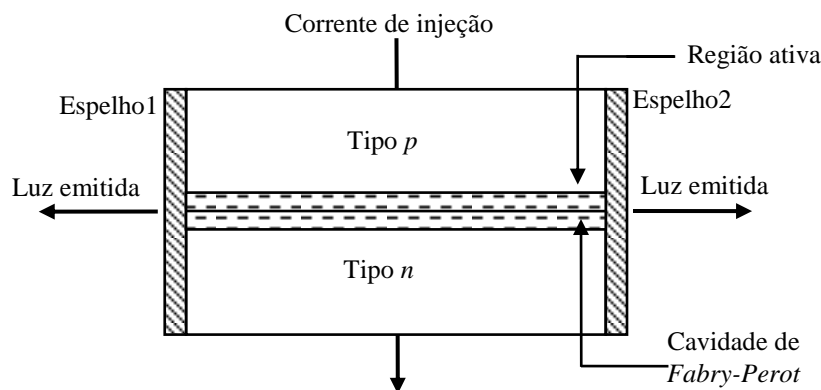
Em LEDs, a condição é alcançada com polarização direta na junção com a qual se consegue acúmulo de elétrons na banda de condução do material e excesso de lacunas em sua banda de valência. Nestas condições e com material de banda proibida direta, ocorre a recombinação de elétrons e lacunas e a conseqüente emissão de energia no comprimento de onda correspondente à banda proibida. A potência óptica emitida cresce quase linearmente com a corrente de polarização. Geralmente, trata-se de um dispositivo capaz de fornecer baixa potência óptica (até algumas dezenas de microwatts). São mais baratos do que os diodos lasers e indicados para sistemas de pequenas distâncias, compatíveis com seus níveis de potência. Apresenta outras características de relevância, como pequeno consumo de energia, longa vida útil e disponibilidade de comprimentos de onda em uma grande faixa de valores, entre o infravermelho e o ultravioleta. Além da baixa potência, apresenta outros inconvenientes, como uma largura espectral grande, podendo ultrapassar 10% do comprimento de onda central. Este fato limita a sua taxa máxima de modulação [10].

O diodo laser opera na condição de emissão estimulada, que ocorre quando a corrente de polarização direta ultrapassar certo valor mínimo de limiar. É capaz de fornecer potências ópticas substancialmente maiores do que nos LEDs, alcançando até centenas de miliwatts. Normalmente, incorpora também um sistema de focalização que lhe garante a emissão de um feixe óptico mais diretivo. Assim, este recurso torna-se fundamental nos sistemas que exijam acoplamento a uma fibra óptica ou para direcionar a energia transmitida em um enlace de FSO. Neste caso, na extremidade do receptor chega um feixe de luz menos espalhado espacialmente, com melhor eficácia na captação do feixe. Salienta-se, ainda, que no crescimento da potência óptica sob a ação de um pulso de corrente, o diodo laser apresenta tempo de subida muito pequeno comparado com o LED. Conseqüentemente, tem capacidade de modulação com taxas muito mais elevadas, podendo chegar a vários gigabits por segundo.

Nos sistemas FSO, a atmosfera impõe perdas severas ao feixe óptico e estas propriedades incentivam o emprego dos diodos lasers para maior confiabilidade no que diz respeito ao alcance e à quantidade de informação transmitida [10][21][24]. Desenvolveram-se muitos modelos de diodos lasers para comunicações, desde os tipos mais simples com cavidade de *Fa-*

*bry-Perot* até os de baixíssimas larguras espectrais, como os de realimentação distribuída (DFB, *distributed feedback*) e o de emissão de superfície com cavidade vertical (VCSEL, *vertical-cavity surface-emitting laser*) [10][21].

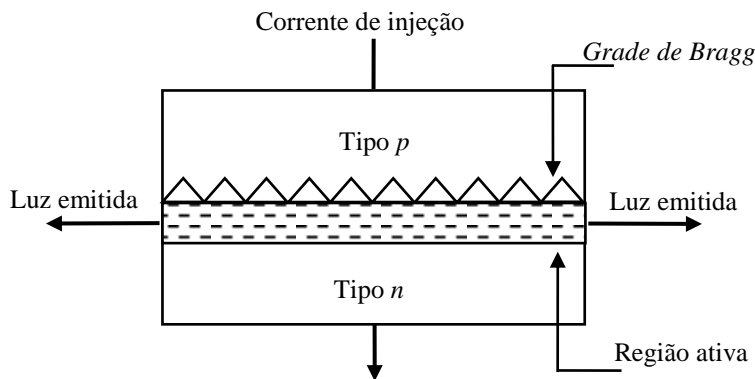
**(b) Diodos laseres com cavidade de Fabry-Perot (FP).** É composto por uma cavidade ressonante formada por dois espelhos planos parcialmente transparentes nas extremidades do dispositivo, com suas superfícies refletoras paralelas entre si, como mostra a Figura 2.3. Um dos espelhos é projetado para refletir a maior parte da luz incidente e outro para refletir uma quantidade menor e permitir a transferência de parte da luz que é gerada em sua estrutura. O diodo laser transmite a maior parte de sua energia em um comprimento de onda central, distribui a outra parte da energia em comprimentos de onda em torno do valor central e em diferentes modos de emissão. Quando o feixe óptico for modulado, ocorrem modificações nesses comprimentos de onda durante o processo. Acontece, principalmente, pela variação do índice de refração do dispositivo com a diferença de concentração de portadores em seu interior e com a temperatura. A consequência é um comprimento de onda dominante com uma largura espectral típica da ordem de alguns nanômetros [23]. Por isso, em geral, o diodo laser de *Fabry-Perot* é mais indicado para sistemas de comunicações ópticas com menores taxas de transmissão [23][24][25].



**Fig. 2.3.** Estrutura básica de um diodo laser com cavidade de Fabry-Perot.

**(c) Diodos laseres de realimentação distribuída.** O diodo laser de realimentação distribuída (DFB, *distributed feedback*) possui um sistema de múltiplas reflexões por meio de uma grade microscópica em seu ambiente de formação do feixe. Essa estrutura é capaz de reforçar de maneira muito substancial o nível de potência relativo ao comprimento de onda desejado. Os

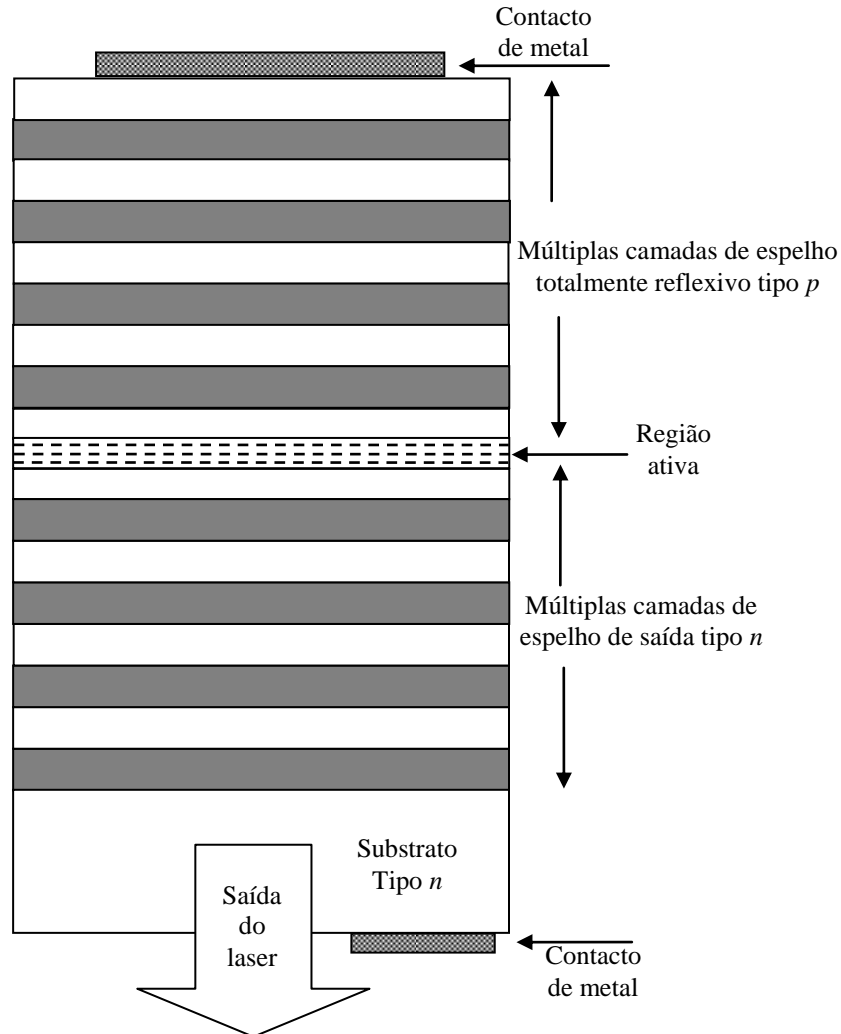
demais valores gerados a partir das transições de elétrons entre os níveis de energia são muito atenuados. Desta maneira, o dispositivo fica otimizado para transmitir em um comprimento de onda central e pequena largura espectral. Um dos processos usuais do mecanismo de seleção é a estrutura periódica chamada *grade de Bragg* [21], fabricada próxima da região ativa do diodo. Atua por meio de reflexões do feixe de luz não apenas em uma única região, mas de forma distribuída nas curvaturas ou inclinações da estrutura periódica. Como resultado desse arranjo, o campo óptico emitido concentra-se principalmente no comprimento de onda do modo dominante. Para este dispositivo, a irradiação em 1550nm pode apresentar uma largura espectral típica inferior a 0,01nm [21]. A Figura 2.4 ilustra o princípio de funcionamento e a estrutura básica de um laser de realimentação distribuída.



**Fig. 2.4.** Representação de um diodo laser com realimentação distribuída.

**(d) Diodos lasers de cavidade vertical e emissão de superfície.** Os diodos lasers de emissão de superfície com cavidade vertical (*VCSEL*, *vertical cavity surface emitting laser*) são as fontes ópticas mais utilizadas nos enlaces FSO. Possui uma cavidade ressonante vertical perpendicular à sua região ativa, conforme representada na Figura 2.5. A emissão de luz é na direção normal a essa região e possui formato de feixe com secção transversal aproximadamente circular. A cavidade agregada ao dispositivo é constituída por regiões muito finas que atuam como espelhos acima e abaixo da região ativa. O feixe óptico gerado na região ativa incide nesses espelhos e com as reflexões estabelecem as condições de reforço no comprimento de onda desejado com a atenuação dos valores indesejáveis. Algumas vantagens que se destacam e relevantes para os sistemas de comunicações ópticas do espaço aberto são a baixa corrente de limiar, potência óptica mais elevada em relação aos outros modelos, maior estabilidade de

suas características face às alterações na temperatura, pequeníssima largura espectral [23]. Modernamente, identificam-se dispositivos fabricados com esta tecnologia capazes de garantir uma largura espectral correspondente até alguns megahertz em torno do comprimento de onda de 1550nm [26].



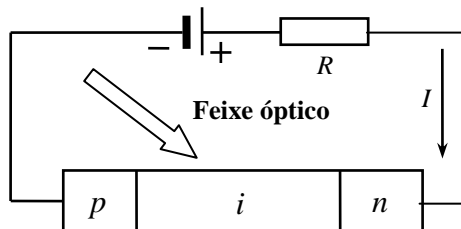
**Fig. 2.5.** Representação de um diodo laser de cavidade vertical e emissão de superfície.

## 2.4 Principais fotodetectores

**(a) Especificações gerais.** A escolha de um fotodetector aplicável a sistemas de comunicações ópticas é tão importante quanto a da fonte transmissora. É necessário levar em conta as características dos diferentes tipos e optar pelo que garantir melhor desempenho no enlace. É importante verificar se apresentam alta sensibilidade aos comprimentos de onda a serem utilizados e que sua resposta em frequência seja adequada à máxima taxa de modulação do feixe.

Além disto, deve apresentar baixo ruído, custo acessível e baixa sensibilidade às variações de temperatura. Modelos capazes de cumprir estas exigências são os fotodiodos do tipo *p-i-n* (*PPD, pin photodiode*) e diferentes tipos de fotodetector de avalanche (*APD, avalanche photodiode*) [21].

**(b) Fotodiodos *p-i-n*.** Este fotodetector possui uma camada semicondutora intrínseca entre as regiões *p* e *n* de uma junção semicondutora. Essa camada é maior que as outras que possuem maior concentração de dopagem. Isto permite um aumento na região de depleção do dispositivo, ampliando a probabilidade de liberação de elétrons sob a influência do feixe óptico incidente. Estas características exigem um projeto rigoroso da extensão da camada intrínseca para limitar o tempo máximo de trânsito dos portadores, pois um valor muito elevado também limitaria a resposta em frequências altas. Os fotodiodos *p-i-n* são utilizados nos enlaces de curtas distâncias e apresentam custos mais baixos em relação a outros modelos. A Figura 2.6 ilustra o esquema de um fotodiodo *p-i-n* e a representação de seu funcionamento. Devido à extensão da camada intrínseca, a zona de depleção estende-se por ela e a maior parte dos fótons será absorvida nessa região. Com isto, consegue-se maior responsividade e menor tempo de subida em relação aos fotodiodos convencionais.



**Fig. 2.6.** Princípio de funcionamento de um fotodiodo *p-i-n*.

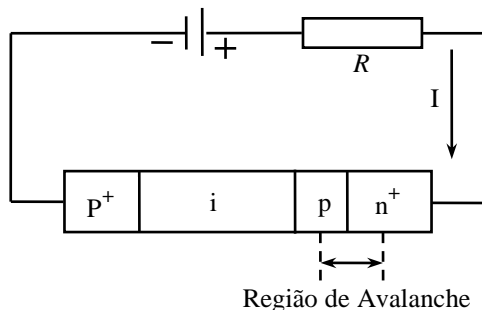
**(c) Fotodiodos de avalanche.** O fotodiodo de avalanche possui um ganho interno relativamente à fotocorrente gerada. Isto aumenta sua responsividade, mas redundando em comprometimento na relação sinal-ruído. No funcionamento desses fotodiodos, é absorvida certa quantidade de fótons, principalmente na zona de depleção, e formam pares elétrons-lacunas. Essas cargas são aceleradas pelo elevado campo elétrico na junção polarizada reversamente e adquirem grande energia cinética. As cargas sob elevada aceleração colidem com outras partículas do semicondutor e a transferência de parte dessa energia é suficiente para formar outros pares elétrons-lacunas. De novo, os pares secundários são acelerados e colidem com átomos, liberando outros elétrons, também acelerados. A partir de um valor especificado da tensão de po-



larização reversa, o processo torna-se acumulativo dando origem à avalanche [23][27]. O resultado é uma fotocorrente multiplicada em relação à obtida com o fotodiodo *p-i-n* original, caracterizando um ganho interno de corrente. Trata-se de uma vantagem significativa que permite construir receptores mais sensíveis do que os que empregam fotodiodos *p-i-n*.

Simultaneamente, o processo envolvendo aceleração, colisão e modificação de velocidade é intrinsecamente aleatório e responsável por um aumento no ruído do dispositivo [28]. Ainda assim, seu emprego garante maiores margens de segurança do enlace, possibilitando a atuação mesmo sob condições de perdas elevadas, sejam por atuação do meio, sejam por ampliação na distância entre o transmissor e o receptor. A Figura 2.7 representa um esquema típico de um APD e a geração da fotocorrente a partir da incidência do feixe óptico modulado.

A Tabela 2.1 compara valores típicos das características de fotodiodos *p-i-n* e os de avalanche, conforme o material com que são construídos. Os fotodiodos à base de germânio são pouco utilizados devido à alta corrente de escuro, que aparece por efeito dos portadores minoritários mesmo em ausência do feixe óptico. A consequência é aumento do ruído de disparo associado ao fenômeno. Os APDs são mais aplicados em um sistema óptico no espaço aberto, pois o seu ganho interno possibilita a construção de receptores mais sensíveis do que os fabricados com fotodiodos *p-i-n*. Isto significa maiores margens de segurança do enlace no que diz respeito aos efeitos da atmosfera. Alguns sistemas comerciais empregam fotodiodo *p-i-n* de silício com sensibilidade entre  $-30\text{dBm}$  e  $-36\text{dBm}$ , para taxas de modulação até  $150\text{Mb/s}$  e taxa de erro de bit (*BER*, *bit error rate*) inferior a  $10^{-9}$ . Relatam-se modelos de APDs de silício com sensibilidade entre  $-40\text{dBm}$  e  $-46\text{dBm}$  [29].



**Fig. 2.7.** Estrutura interna de um fotodiodo avalanche (APD).

**Tabela 2.1:** Características típicas de fotodiodos PIN e APD à base de Si, Ge e InGaAs [11][21][24]

Tipo de material	Silício (Si)		Germânio (Ge)		Arsenieto de gálio e índio	
	p-i-n	APD	p-i-n	APD	p-i-n	APD
<b>Fotodetectores</b>						
<b>Comprimento de onda (nm)</b>	400-1100	400-1100	800-1800	800-1800	900-1700	900-1700
<b>Responsividade R (A/W)</b>	0,6	77-130	0,65-0,7	3-28	0,63-0,8	0,75-0,97
<b>Eficiência quântica (%)</b>	60-90	70-80	50-55	55-75	60-90	60-90
<b>Ganho interno</b>	1	150-250	1	5-40	1	10-30
<b>Fator de ruído em excesso</b>	--	0,3-0,5	--	0,95-1	--	0,7
<b>Corrente de escuro (nA)</b>	1-10	0,1-1	50-500	10-500	1-20	1-5
<b>Capacitância de junção (pF)</b>	1,2-3	1,3-2	2-5	2-5	0,5-2	0,5
<b>Tempo de subida (ns)</b>	0,5-1	0,1-2	0,1-0,5	0,5-0,8	0,06-0,5	0,1-0,5

A sensibilidade de receptores com fotodiodos *p-i-n* de arsenieto de gálio e índio (InGaAs) é cerca de 3dB melhor do que os fotodiodos *p-i-n* de Si [30], medidos nos respectivos comprimento de onda de maior sensibilidade (Si em torno de 900nm e InGaAs em torno de 1700nm). Por outro lado, os fotodiodos APD de Si fornecem maiores ganhos a menor fator de excesso de ruído quando comparado aos fotodiodos APD de InGaAs, Nesta comparação, a sensibilidade de receptores com fotodiodos APD de Si podem ser de 3dB a 4 dB melhor do que os dos receptores com fotodiodos APD de InGaAs. É conveniente salientar que o comprimento de onda de corte dos diodos de Si puro é 1110nm. Portanto são incompatíveis com os sistemas modernos de comunicações a fibras ópticas. Entretanto, são muito úteis em sistemas que operam em comprimentos de onda inferiores ao seu valor de corte.

## 2.4 Comentários sobre o capítulo

Apresentaram-se os fundamentos das comunicações ópticas no espaço aberto (FSO), as suas principais aplicações, vantagens e desvantagens em relação às tecnologias sem fio na faixa de radiofrequência e cabeadas. Fez-se uma descrição desse sistema e de seus principais componentes, como as fontes ópticas e os fotodetectores mais utilizados. As fontes ópticas apresentadas foram diodos emissores de luz (LEDs) e os diodos lasers (LD). Os diodos lasers são mais usados por apresentarem potências ópticas mais elevadas e pequeníssima largura espectral comparada com os LEDs. Os fotodetectores mais comuns são os fotodiodos *p-i-n* e os diodos de avalanche (APDs). Neste trabalho, utilizou-se um fotodetector *p-i-n* de arsenieto de gálio e índio, modelo 818-BB-35F da Newport® para a recuperação do sinal elétrico transmitido.

## Capítulo 3

### Características de propagação óptica no meio ilimitado

#### 3.1 Propagação das ondas eletromagnéticas no espaço aberto

(a) **Equações de Maxwell.** As ondas eletromagnéticas são descritas a partir das equações de Maxwell, que mostram a interação dos componentes do campo elétrico e do campo magnético. Estas equações são representadas na forma diferencial no domínio do tempo por [31]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{h} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = \sigma \vec{e} + \varepsilon \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{h}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{e} = \rho \quad (\text{Lei de Gauss para o campo elétrico}) \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{b} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o campo Magnético}) \quad (3.4)$$

sendo  $\vec{e}$  o campo elétrico em volts/metro (V/m),  $\vec{b}$  a indução magnética em teslas (T),  $\vec{h}$  campo magnético em ampères/metro (A/m),  $\vec{d}$  o deslocamento elétrico em coulombs/m<sup>2</sup> (C/m<sup>2</sup>),  $\sigma$  a condutividade do meio em siemens/metro (S/m),  $\rho$  a densidade volumétrica de cargas em coulombs/m<sup>3</sup>,  $\vec{j}$  a densidade de corrente em ampères/m<sup>2</sup> (A/m<sup>2</sup>),  $\varepsilon$  a permissividade elétrica em farads/metro (F/m) e  $\mu$  a permeabilidade magnética do meio em henrys/metro (H/m).

Com a variação das grandezas eletromagnéticas de forma harmônica no tempo, as equações de Maxwell são expressas no domínio da frequência como:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + i\omega\varepsilon) \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\varepsilon \vec{H} \quad (3.6)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.8)$$

em que  $\omega$  é a frequência angular e  $i$  a unidade imaginária nas grandezas complexas.

**(b) Equação de onda para campos harmônicos no tempo.** Admitindo uma região isenta de cargas ( $\rho = 0$ ), a combinação de (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) levam às *equações de onda* ou *equações de Helmholtz*, dadas por:

$$\nabla^2 \vec{E} - i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)\vec{E} = 0 \quad (3.9)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)\vec{H} = 0 \quad (3.10)$$

Ambas são equações de onda vetorial que descrevem o campo elétrico e o campo magnético harmônicos no tempo e seu deslocamento no meio ilimitado. As soluções para o campo elétrico e para o campo magnético destas equações apresentam-se como:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{\pm\vec{\gamma}\cdot\vec{r}} \quad (3.11)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{\pm\vec{\gamma}\cdot\vec{r}} \quad (3.12)$$

que são as componentes principais de uma onda eletromagnética plana no meio. Nestas soluções,  $\vec{E}_0$  e  $\vec{H}_0$  são as constantes que indicam os valores no plano em que o produto escalar mostrado no expoente  $\vec{\gamma}\cdot\vec{r}$  for igual a zero. Neste produto,  $\vec{r}$  é o vetor posição do ponto do espaço onde se deseja determinar o campo,  $\vec{\gamma} = \gamma\hat{\gamma}$  é o *fator de propagação*, relacionado com as propriedades eletromagnéticas do meio. Sua direção determinará a direção de deslocamento da onda eletromagnética e seu valor escalar, que resulta em uma quantidade complexa, mostrará as alterações nas amplitudes e nas fases, à medida que os campos propagam-se no meio. Nesta representação,  $\hat{\gamma}$  é o vetor unitário da direção do vetor complexo  $\vec{\gamma}$ . As reduções nas amplitudes com a distância dependem da parte real e as correspondentes variações de fase dependem da parte imaginária deste vetor. Como devem ser previstas reduções nas amplitudes com os respectivos movimentos, o sinal (-) no expoente indica o deslocamento dos campos na direção positiva da projeção do vetor posição sobre a direção do vetor de propagação.

Para satisfazer as equações de onda no domínio da frequência, o valor escalar complexo do fator de propagação tem de ser dado por:

$$\gamma = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)} = \alpha + i\beta \quad (3.13)$$

sendo  $\alpha$  o fator de atenuação do campo em nepers por metro (Np/m) e  $\beta$  o fator de fase em radianos por metros (rad/m). O fator de atenuação indica a redução nas amplitudes dos campos por causa de absorção de energia no meio de propagação. Em dielétricos perfeitos, a conduti-

vidade é nula e o fator de atenuação fica igual a zero, indicando que a onda plana, na direção de propagação, não sofreria redução nas amplitudes de suas componentes. Em dielétricos reais, a condutividade é diferente de zero, ainda que muito pequena, prevê-se a conversão de parte da energia eletromagnética em calor, com a conseqüente redução nas amplitudes. Por outro lado, o fator de fase relaciona-se ao comprimento de onda  $\lambda$ , que é a distância necessária para introduzir uma variação de  $2\pi$  radianos na fase de um campo harmônico no tempo. Este parâmetro está associado, também, à velocidade de propagação no meio ( $v_p$ ) e a, partir de (3.13), seu valor é determinado por:

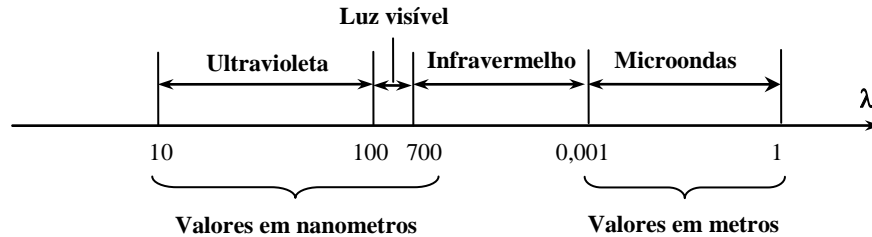
$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v_p}{f} = \frac{c}{N f} \quad (3.14)$$

em que  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s  $\cong 3 \times 10^8$  m/s é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo e  $N$  é o *índice de refração* no meio, um valor que indica os efeitos das propriedades eletromagnéticas do ambiente de propagação sobre a velocidade da onda.

### 3.2 Espectro eletromagnético

As equações de Maxwell descrevem a propagação das ondas eletromagnéticas em diferentes meios. Inclui os efeitos da frequência desde valores muito pequenos até valores elevados, como diferentes faixas de radiofrequência, e frequências muito mais altas, como as que constituem as faixas de luz (visíveis e invisíveis) e de outras radiações, como, por exemplo, os raios X e os raios cósmicos. O *espectro eletromagnético* agrupa as frequências de todas essas emissões, e, teoricamente, estende-se até o infinito. É usual dividi-lo em faixas para avaliação de desempenho e de suas características mais relevantes. Uma parcela refere-se às radiações ionizantes, que incluem os raios ultravioletas, raios gamas e raios-X, que apresentam comprimentos de onda muito curtos, não sendo adequadas para comunicações. Outra parte não-ionizante inclui as ondas de rádio, as microondas, ondas milimétricas, o infravermelho e a luz visível, utilizadas para fins de comunicações. Os sistemas ópticos no espaço aberto operam na faixa de infravermelho, na sub-região conhecida como infravermelho próximo. Em sua transmissão pela atmosfera, sofre absorções, principalmente pela presença de moléculas de água (H<sub>2</sub>O) associadas aos outros gases que formam esse meio de propagação. Esta parte da faixa de infravermelho é importante para fins de comunicações ópticas e sua interação com o meio será

mais comumente avaliada nas análises dos efeitos da neblina. A Figura 3.1 ilustra a divisão de uma parte do espectro eletromagnético para situar a faixa de infravermelho.



**Fig. 3.1.** Indicação de algumas faixas de frequência do espectro eletromagnético, situando a faixa de infravermelho, ocupada em parte por sistemas de comunicações ópticas.

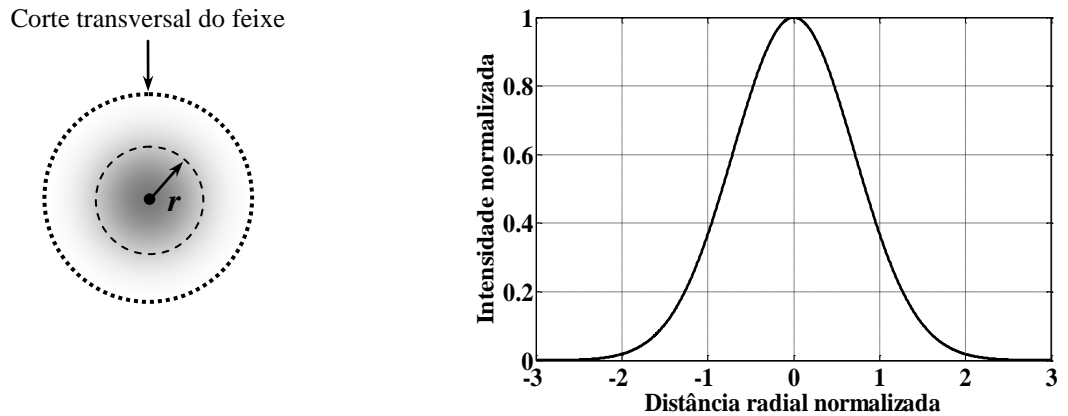
O infravermelho é a região do espectro na faixa de 700nm a 1000000nm, entre a luz visível e microondas, dividido em três sub-regiões [32]. O *infravermelho próximo* inclui comprimentos de onda que vão de 700nm a 1900nm, aproximando-se da luz visível. Faz parte da emissão solar para a qual a atmosfera é bem transparente. Em sistemas de comunicações ópticas cabeados, nesta sub-região identificam-se algumas janelas de baixa atenuação nas fibras ópticas empregadas. O *infravermelho médio*, com comprimentos de onda entre 1900nm e 6000nm, tem aplicações em sistemas militares, como no controle de lançamentos de mísseis [33]. Os comprimentos de onda entre 6000nm e 1000000nm constituem o *infravermelho distante*, de grande relevância por fazerem parte na formação de imagens térmicas.

Os sistemas FSO disponíveis operam no infravermelho próximo, faixa em que foram desenvolvidos componentes e dispositivos de elevados desempenhos [34]. A baixa atenuação e pequenas dispersões alcançadas em transmissões por fibras ópticas em comprimentos de onda entre 1520nm e 1600nm levaram ao desenvolvimento de técnicas de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM, Wevelangth Division Multiplexing*), com imensa ampliação na capacidade dos sistemas [35]. Uma vez que as comunicações em FSO complementam as transmissões ópticas instaladas, seus projetos atuais são efetuados para os mesmos comprimentos de onda. No entanto, em função de suas exigências específicas, como os níveis exigidos de potência das fontes ópticas e a sensibilidade dos fotodetectores, os dispositivos e outras partes próprias ao seu desempenho são de custos mais elevados. Considerando as limitações atuais, novos estudos estão sendo efetuados em outros comprimentos de onda. Pode-se citar o valor de 10 $\mu$ m no qual se estudam as atenuações por agentes agregados à atmosfera, como o

nível de umidade, a neblina, a chuva, etc. Ainda que se tenha verificado a sua conveniência para certas aplicações, ainda apresenta dificuldades no que concerne aos processos de focalização e à disponibilidade de componentes e dispositivos confiáveis [35].

### 3.3 Propagação do feixe óptico

**(a) Distribuição transversal do feixe óptico.** A propagação de um feixe óptico pode ser mais bem colimada se o meio for o vácuo. Na atmosfera, sofre efeitos de espalhamentos, absorções e difrações nas partículas do meio e sempre surgem maiores divergências na trajetória original. Neste aspecto, o fenômeno da difração passa a ter um papel relevante. A teoria permite prever a expansão do feixe à medida que ocorre a propagação. Por causa dos processos usuais de geração de luz pelas fontes empregadas em comunicações [21], em seu corte transversal a intensidade óptica assume uma distribuição aproximadamente gaussiana ao longo do diâmetro do feixe. Exemplos são os lasers de tipo monomodo que produzem feixes estreitos e na saída da fibra acoplada à sua região emissora tem o aspecto da Figura 3.2 [36].



**Fig. 3.2.** (a) Distribuição aproximada de um feixe óptico empregado em comunicações. (b) Intensidade óptica ao longo da direção radial do feixe.

Com relação à figura que descreve o feixe óptico, a intensidade de irradiação para distribuição gaussiana deve obedecer a uma expressão do tipo:

$$I = I_0 e^{-(r/w_0)} \quad (3.15)$$

sendo  $r$  a distância radial e  $w_0$  o raio no qual a intensidade óptica cai de  $1/e$  em relação ao valor máximo no centro do feixe. Provisionando a projeção desse feixe em um anteparo, define-se a *dimensão do ponto* de luz.

**(b) Feixe óptico progressivo.** Com as lentes empregadas nas fontes ópticas, o feixe gaussiano que se propaga no espaço ilimitado pode ser considerado como uma onda transversal com uma superfície equifásica quase esférica nas regiões próximas da emissão. Como o objetivo é avaliar o desempenho entre o transmissor e o receptor, que possui uma área de captação pequena em relação à expansão do feixe, pode-se admitir uma frente de onda quase plana (aproximação paraxial). Em seu deslocamento, o feixe primeiramente diminui sua secção transversal e quando seu raio igualar-se ao valor  $w_0$  tem-se a denominada *cintura do feixe*. Em seguida, inicia-se nova expansão, segundo o esquema da Figura 3.3. Em geral, especifica-se a origem do sistema nesta análise coincidente com a extensão que define a cintura do feixe. Quando o diâmetro do feixe corresponder a novo raio com valor igual a  $w_r = w_0 \sqrt{2}$  tem-se o *comprimento de Rayleigh* ( $z_r$ ). Com estas descrições, demonstra-se que o raio do feixe e a sua curvatura no sentido longitudinal obedecem às leis de variação [37]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2} \quad (3.16)$$

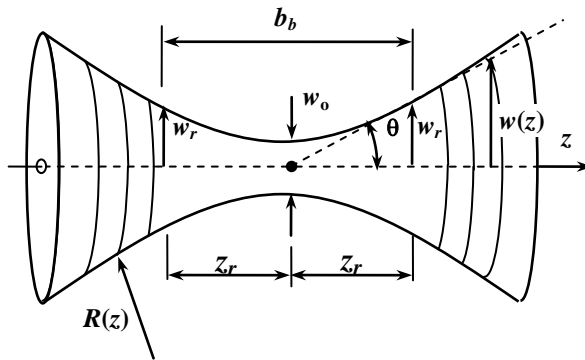
$$R(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{z_r}{z}\right)^2 \right] \quad (3.17)$$

Os parâmetros  $z_r$  e  $w_0$  são inter-relacionados na forma:

$$z_r = \frac{\pi N w_0^2}{\lambda_0} \quad (3.18)$$

onde  $N$  é o índice de refração do meio e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda do feixe no vácuo [37]. Ainda que o feixe torne-se divergente com a propagação, sua intensidade permanece com perfil gaussiano em sua secção transversal. Analisando (3.16), observa-se que o raio do feixe de laser descreve uma hipérbole no espaço, como na Figura 3.3. Seu raio de curvatura e seu diâmetro variam à medida que se propaga na direção especificada ( $z$ , no caso). Tem-se  $w(z) = w_0$  em  $z = 0$  e quando o feixe afastar-se de sua cintura, o raio sofre pequena variação no início e diverge quase linearmente nas coordenadas iniciais. Quanto menor for o raio da cintura, mais rapidamente o feixe diverge e menor será à distância onde poderá ser colimado [38].





**Fig. 3.3.** Variação do feixe de laser ao longo do percurso de propagação, com a identificação de alguns valores para a sua descrição.

(c) **Divergência de um feixe.** O feixe óptico propaga-se com uma abertura angular definida como *divergência do feixe* que se relaciona com o espalhamento ao longo da propagação. De (3.16) e (3.18), verifica-se que o diâmetro do feixe modifica-se conforme o seu valor inicial, segundo a expressão:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_0 z}{\pi N w_0^2} \right)^2} = \sqrt{w_0^2 + \left( \frac{\lambda_0 z}{\pi N w_0} \right)^2} \quad (3.19)$$

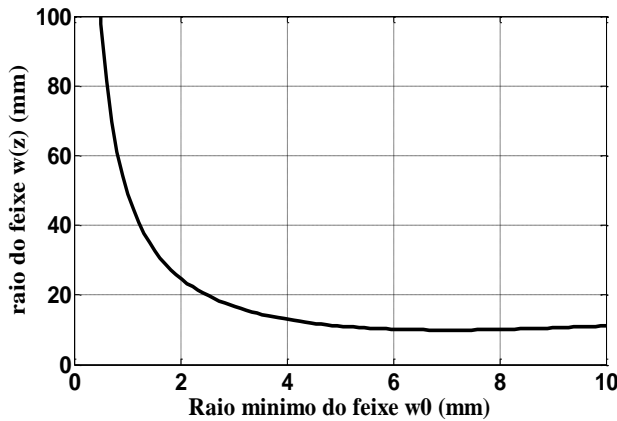
Existe, então, um diâmetro inicial ótimo para o qual resulta em menor diâmetro do feixe ao longo da propagação. Para avaliá-lo, admite-se uma distância constante, deriva-se a expressão anterior em relação à  $w_0$  e iguala-se o resultado a zero. Chega-se ao valor mínimo de

$$w_{00} = \sqrt{\left( \frac{\lambda_0 z}{\pi N} \right)} \quad (3.20)$$

Conseqüentemente, em uma distância  $z$  especificada, o novo diâmetro fica:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{w_{00}}{w_0} \right)^4} \quad (3.21)$$

Assim, para um feixe óptico no comprimento de onda de 1550nm e a uma distância de 100m no ar, ter-se-ia um diâmetro inicial ótimo de 7mm, aproximadamente. Com isto, o comportamento típico do diâmetro do feixe acompanha o gráfico da Figura 3.4, confirmando que não há vantagens em admitir um diâmetro inicial acima de 7mm. Todavia, como a variação é suave em torno do valor ótimo, não há uma diferença muito significativa se o diâmetro inicial ficar entre 4mm e 10mm. Nestes limites, o diâmetro do feixe a 100m ficaria entre os limites de 13mm, passando por 10mm na condição ótima e chegando a pouco acima de 11mm.



**Fig. 3.4.** Comportamento do raio do feixe para um diâmetro ótimo a distância específica de 100m.

Quando  $z \gg z_r$  dado em (3.18), o raio do feixe aumenta quase linearmente com a distância segundo a relação aproximada:

$$w(z) \cong \frac{\lambda z}{\pi w_0} = z \operatorname{tg} \theta \quad (3.22)$$

onde  $\theta$  é identificado como *ângulo de divergência*. Quando ocorrer pequena divergência (menor ou igual a  $10^\circ$ ) pode-se aproximar o ângulo em radianos de sua tangente e obtém-se:

$$\theta \cong \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\lambda}{\pi w_0} \right) \cong \left( \frac{\lambda}{\pi w_0} \right) \quad (3.23)$$

**(d) Expansores de feixe.** O feixe possui uma divergência que provoca expansão em seu diâmetro. Por isso, no final do enlace é necessário utilizar um dispositivo para concentrar a potência do feixe em uma pequena área. Para isto, utiliza-se uma lente, cujas características ópticas e geométricas são de grande relevância para a qualidade do sinal captado no receptor. É importante, por exemplo, verificar o diâmetro e a distância focal da lente para garantir a eficácia do sistema. Se a lente tiver diâmetro menor que o do feixe, parte da potência será perdida por difração em suas bordas e por limitação em sua área de captura, pois a lente não cobrirá todo o diâmetro do feixe. Se ocorrer às perdas mencionadas, haverá uma limitação importante na extensão do enlace. Há outros fatores que degradam o feixe óptico, como, por exemplo, uma obstrução ocasional sobre um feixe óptico de pequeno diâmetro.

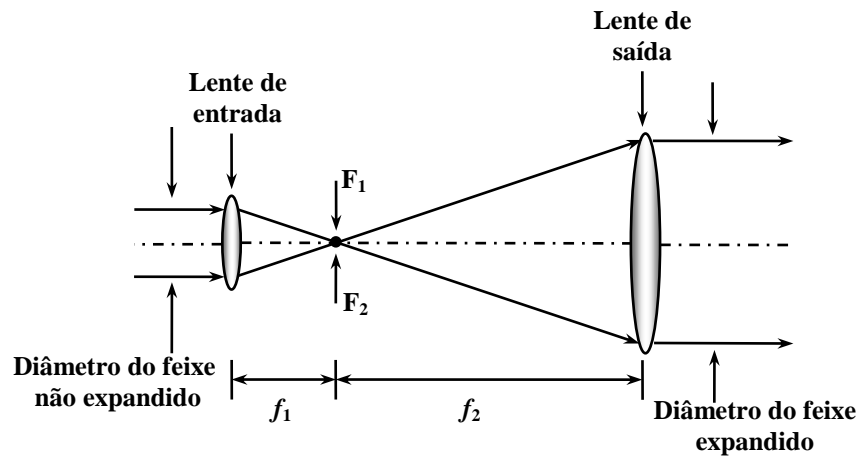
Para garantir uma transmissão com menores influências de obstruções, o diâmetro do feixe e o ângulo de divergência devem ser maiores do que um valor crítico, abaixo do qual a degradação torna-se acentuada. O dispositivo utilizado para modificar o raio mínimo de feixe e re-

duzir o ângulo de divergência chama-se *expansor de feixe*. Atua como se fosse um pequeno telescópio invertido formado por duas lentes. A lente de entrada, de menor diâmetro, é responsável por garantir um feixe com determinado diâmetro. Em seguida, tem-se uma segunda lente que expande esse feixe para um maior diâmetro. As duas lentes são posicionadas para haver coincidência de seus pontos focais ( $F_1$  e  $F_2$ ), como no esquema da Figura 3.5 [39][40].

O diâmetro do feixe expandido é dado por [36]:

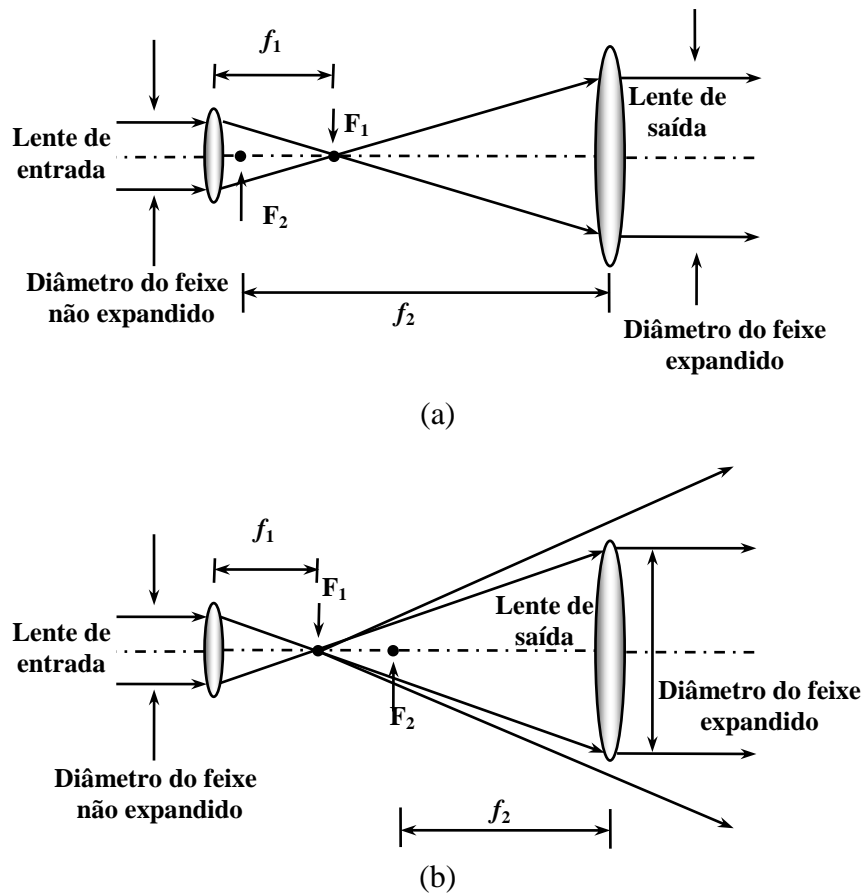
$$D_0 = \left( \frac{f_2}{f_1} \right) D_i \quad (3.24)$$

em que  $f_1$  e  $f_2$  são as distâncias focais das lentes de entrada e de saída, respectivamente,  $F_1$  e  $F_2$  são os focos das lentes de entrada e de saída e  $D_i$  é o diâmetro do feixe não expandido.



**Fig. 3.5.** Representação de um expansor de feixe utilizando duas lentes com diâmetros e pontos focais ajustados conforme o diâmetro final desejado.

A Equação (3.24) só é válida quando o foco da lente de entrada coincidir com o da lente de saída, como na Figura 3.5. Se o ponto focal da lente de entrada estiver à direita do foco da lente de saída, o diâmetro máximo do feixe expandido diminuirá. Neste caso, a lente de saída não será bem aproveitada, como ilustra a parte (a) da Figura 3.6. Se o foco da lente de entrada estiver à esquerda da lente de saída, o diâmetro do feixe será maior que o diâmetro da lente de saída e haverá perda de potência, como mostra a Figura 3.6(b) e tem-se a pior situação por causa da perda de potência. A condição mostrada na parte (a) não implica perda de potência, mas uma diminuição do diâmetro do feixe óptico e menor aproveitamento da lente.



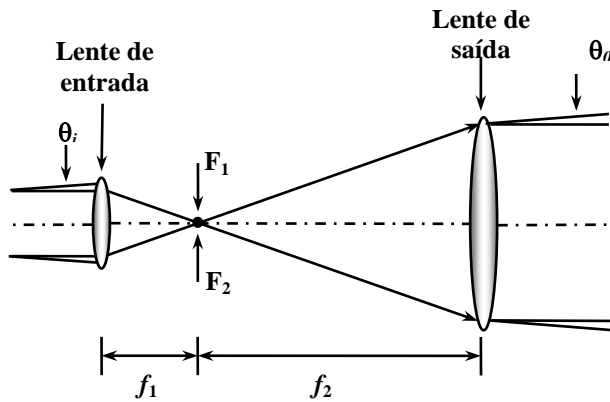
**Fig. 3.6.** Expansores de feixe com lentes na posição incorreta. (a) Situação em que resulta pouco aproveitamento da lente de saída. (b) Aumento da perda de potência na recepção.

Como mencionado, o expensor de feixe reduz o ângulo de divergência e com lentes adequadas chega-se a um ângulo dado por

$$\theta_0 = \left( \frac{f_1}{f_2} \right) \theta_i \quad (3.25)$$

sendo  $\theta_i \cong \lambda/D_i$  e  $\theta_0$  são os ângulos de divergência representados na Figura 3.7. Invertendo e isolando o termo  $\frac{f_2}{f_1}$  de (3.24) e substituindo em (3.25), resulta:

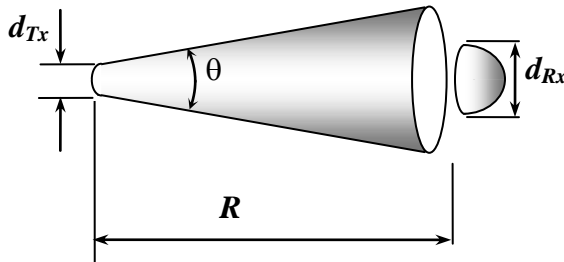
$$\theta_0 \cong \left( \frac{D_i}{D_0} \right) \theta_i \quad (3.26)$$



**Fig. 3.7.** Expansor de feixe com lentes propriamente casadas e detalhamento dos ângulos de divergência.

### 3.4 Atenuação geométrica

A atenuação geométrica é resultado da divergência do feixe de luz na atmosfera. Esta divergência aumenta a área da seção reta do feixe, à medida que se distancia da transmissão, segundo certo ângulo de divergência. Portanto, o diâmetro do feixe que chega ao receptor é maior do que o da transmissão. Isto significa um espalhamento do sinal e a intensidade óptica que chega ao receptor é menor do que no ponto de origem. A relação entre essas intensidades define a atenuação geométrica do enlace. Embora o crescimento do diâmetro do feixe apresente certa curvatura, como a divergência é pequena, pode-se aproximar esta curvatura para um segmento de reta, como na Figura 3.8.



**Fig. 3.8.** Variáveis envolvidas no cálculo da atenuação geométrica do enlace óptico.

A frente de onda também terá uma pequena curvatura, mas é possível aproximá-la para uma superfície plana, sem erros apreciáveis. Com referência à figura e admitindo que a seção transversal do feixe seja praticamente circular, o seu diâmetro  $d_{lr}$  no local da recepção será:

$$d_{lr} = 2 \left[ r_{tx} + R \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (3.27)$$

sendo  $r_{tx} = d_{tx}/2$  o raio do feixe no local da transmissão e  $R$  a distância radial até o local da recepção. A relação entre as densidades de potência na transmissão e a densidade de potência no local da recepção indica uma atenuação no enlace, sem levar em conta a potência captada pelo receptor. Portanto, em valor numérico, tem-se uma atenuação:

$$A_{tlr} = \frac{P}{\pi r_{tx}^2} \frac{\pi d_{lr}^2}{4P} = \frac{4P}{\pi d_{tx}^2} \frac{\pi d_{lr}^2}{4P} = \frac{d_{lr}^2}{d_{tx}^2} = \frac{[2r_{tx} + 2R \operatorname{tg}(\theta/2)]^2}{d_{tx}^2} \quad (3.28)$$

Verifica-se que a potência capturada na entrada do receptor depende de sua área de captação. Uma vez que a frente de onda é praticamente plana, a relação entre a potência do feixe e a que entra no receptor define a atenuação na recepção. Então,

$$A_{geo} = \frac{S_{feixe} \pi d_{lr}^2}{4} \frac{4}{S_{feixe} \pi d_{rx}^2} = \frac{d_{lr}^2}{d_{rx}^2} = \frac{[2r_{tx} + 2R \operatorname{tg}(\theta/2)]^2}{d_{rx}^2} \quad (3.29)$$

onde  $d_{rx}$  é o diâmetro da superfície de captura na entrada do receptor. Como a divergência do feixe é muito pequena, é possível tornar a tangente aproximadamente igual ao próprio arco. Assim, a expressão anterior modifica-se para:

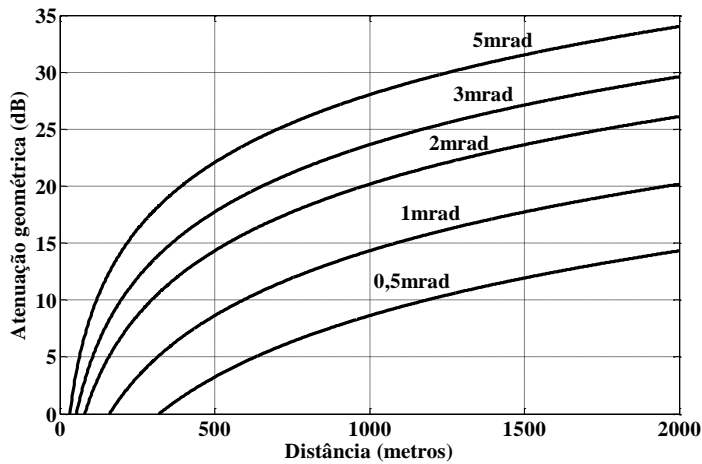
$$A_{geo} = \frac{(d_{tx} + R\theta)^2}{d_{rx}^2} \quad (3.30)$$

frequentemente identificada como *atenuação geométrica* do enlace  $A_{geo}$ .

Na demonstração de (3.28), relaciona-se a potência captada com a fornecida no início do processo de transmissão. Uma vez que a potência captada tem valor menor do que a emitida pela fonte óptica, sua aplicação vale apenas para distâncias tais que

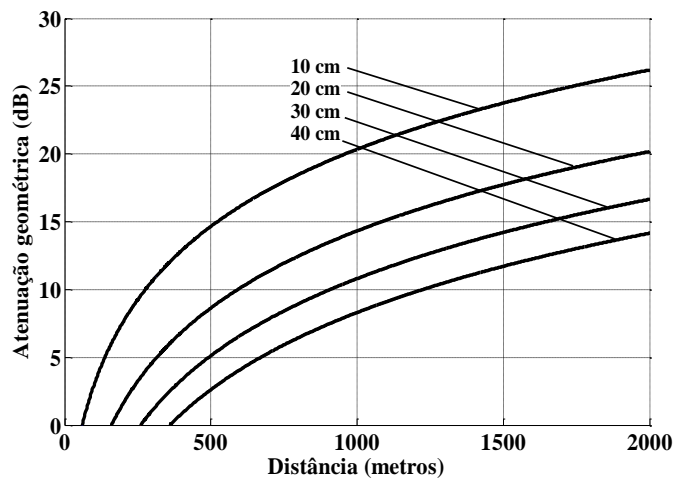
$$R \geq \frac{d_{rx} - d_{tx}}{\theta} \quad (3.31)$$

Há equipamentos que apresentam o diâmetro no lado de emissão de 4 cm e no receptor de 20 cm. A Figura 3.9 ilustra o comportamento da atenuação geométrica para diferentes ângulos da divergência. Os valores foram determinados com a aplicação de (3.27), respeitada a extensão mínima dada por (3.31). Este gráfico demonstra a influência relevante da divergência do feixe sobre a atenuação do enlace. Todavia, uma menor divergência, o que implicaria em menor perda, traria maiores dificuldades em seu alinhamento entre os extremos do enlace.



**Fig. 3.9.** Comportamento da atenuação geométrica em função do comprimento do enlace.

A atenuação geométrica poderia ser reduzida, também, com aumento da área de captação da lente no lado do receptor. A Figura 3.10 ilustra esta atenuação, conforme o comprimento do enlace, para diferentes diâmetros da lente do receptor. Admitiu-se o diâmetro do transmissor de 4 cm e divergência do feixe de 1 miliradiano. Com o aumento do diâmetro no receptor a atenuação diminui, mas no receptor haverá uma maior captação de energia do espectro solar. Desta forma, tem-se um crescimento no ruído de fundo do receptor, degradando a relação sinal-ruído e, por conseqüência, comprometendo a sua sensibilidade. No entanto, se o aumento do ruído de fundo do receptor for menor do que o aumento do nível do sinal, vale considerar o emprego de lente com maior diâmetro no receptor.

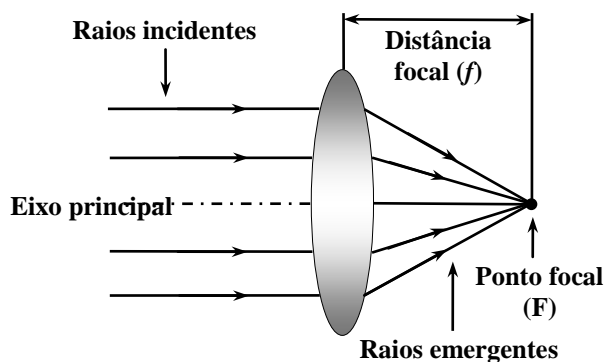


**Fig. 3.10.** Comportamento da atenuação geométrica em função do comprimento do enlace, para diferentes valores do diâmetro da lente no lado do receptor.

### 3.5 Características das lentes ópticas

(a) **Necessidade e especificação de lentes.** A lente é um pequeno segmento de material transparente que altera a trajetória de feixes ópticos, segundo os fenômenos de reflexão, refração e difração. Por causa da refração, altera-se a curvatura das frentes de ondas e permite a focalização em uma pequena região do espaço. É possível, ainda, efetuar a colimação do feixe ou aumentar a sua divergência. As lentes diferem uma das outras quanto a sua forma, o tipo de material utilizado, sua finalidade, etc.. Estas características determinam se os feixes de luz convergem, dependendo do comportamento de seu índice de refração [10][41].

Freqüentemente, as lentes são classificadas quanto ao seu comportamento óptico e as de tipo convergentes assumem as formas biconvexa, plano-convexa e côncavo-convexa. Serão lentes divergentes se suas formações forem de tipo bicôncavo, plano-côncavo e convexo-côncavo. Conforme a lei de Snell, a lente é convergente quando o índice de refração do meio for menor do que o índice de refração da lente. Caso contrário, a lente será divergente. Nas lentes convergentes, idealmente uma onda plana incidente na sua face de entrada sofre refração e pode concentrar em um único ponto, chamado *ponto focal*. A distância entre a lente e este ponto é a *distância focal* (Fig. 3.11). Em uma lente divergente, quando os raios incidirem paralelos ao eixo principal, a refração causa espalhamento para fora do ponto focal.



**Fig. 3.11.** Esquema representativo do comportamento óptico de uma lente convergente.

Especificando como meio 1 aquele de onde vem a onda eletromagnética, que é o mesmo para onde será transferida, e como meio 2 a lente, sua distância focal  $f$  é calculada pela equação de Halley [41]:

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{N_2}{N_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.32)$$



na qual  $N_1$  e  $N_2$  são os índices de refração dos meios 1 e 2, respectivamente,  $R_1$  e  $R_2$  são os raios de curvatura das faces 1 e 2. As lentes serão utilizadas em um enlace ponto-a-ponto, uma no lado da transmissão e outra na recepção. A lente na transmissão fará a colimação do feixe óptico, tornando os seus raios paralelos. A colimação é necessária para não ocorrer muitas variações por difração ao longo do enlace. Com o aumento da concentração de energia, a lente deixará o sistema mais eficiente, necessitando de menor potência para manter o enlace com pequena taxa de erro de bit. Na recepção, a lente focaliza o feixe de luz na área sensível de um fotodetector, componente que fornecerá uma corrente proporcional à potência óptica incidente.

**(b) Perdas de potência nas lentes.** Dois principais mecanismos de atenuação do feixe óptico nas lentes são a *perda por extinção* (absorção e espalhamento) e a perda por reflexão nas superfícies das interfaces ar-lente e vice-versa, frequentemente identificada como *reflexão de Fresnel*. A absorção e o espalhamento são oriundos da interação do feixe óptico com as partículas que constituem o meio de propagação [42]. A reflexão de Fresnel mostra que uma parte do feixe óptico incidente na interface de dois meios com diferentes índices de refração retorna ao primeiro meio. A relação entre o campo refletido e o incidente leva ao coeficiente de reflexão e a relação entre o campo transmitido e o incidente indicará o coeficiente de transmissão. Os valores desses campos são obtidos a partir da aplicação das condições de contorno na interface dos dois meios [43]. Em análises com feixes ópticos, é mais conveniente tratar com os valores da intensidade óptica, grandeza proporcional ao quadrado do módulo do respectivo campo elétrico ou magnético. Desta maneira, para uma incidência normal à interface, o que se busca com a colimação do feixe, o coeficiente de reflexão de potência é [44]:

$$\Gamma_p = \left( \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right)^2 \quad (3.33)$$

sendo  $N_1$  e  $N_2$  os índices de refração do meio 1 e do meio 2. Tratando-se, por exemplo, da interface ar-vidro, os índices de refração são  $N_1 \cong 1$  e  $N_2 \cong 1,5$ , respectivamente. Portanto,

$$\Gamma_p = \left( \frac{1 - 1,5}{1 + 1,5} \right)^2 = 0,04 \quad (3.34)$$

mostrando uma perda por reflexão na ordem de 4% nessa interface. Para diminuir este valor, muitos fabricantes fornecem lentes com superfície revestida por material anti-reflexivo.

### **3.6 Comentários sobre o capítulo**

Foram abordadas as características da propagação de frequências ópticas no meio ilimitado. Estudaram-se as ondas eletromagnéticas em espaço aberto, a partir da solução da equação de Helmholtz. Apresentou-se a propagação de um feixe óptico e observou-se o decréscimo do raio da cintura em determinado ponto. A teoria da difração permite prever a expansão do feixe à medida que ocorre a propagação, ou seja, não importa o quão paralelas forem as trajetórias iniciais, o feixe sempre irá divergir e se expandir. Descreveu-se a atenuação geométrica, resultado da divergência do feixe de luz na atmosfera, e avaliou-se a intensidade menor do feixe que chega ao receptor. Isso significa um espalhamento do sinal ao longo da trajetória de propagação. Uma forma de diminuir a atenuação geométrica é aumentar o diâmetro da lente receptora. Descreveram-se, também, as características de uma lente óptica e suas especificações. Foram utilizadas duas lentes ópticas objetivas de 10x da Newport, uma na transmissão para a colimação do feixe e outra na recepção para a focalização desse feixe.

## Capítulo 4

### Degradação do feixe óptico no espaço aberto

#### 4.1 Descrição geral da atenuação atmosférica

(a) **Causas da atenuação.** Como demonstrado na solução da equação de onda, as amplitudes dos campos sofrem decréscimos quando se propagam em meios materiais. As reduções ocorrem pela presença de certa condutividade do meio, originada por diferentes causas e, em geral, dependem da frequência. Um dos motivos é a absorção de parte da energia por partículas do meio e sua conversão em calor. Em frequências muito elevadas, quando o comprimento de onda torna-se muito pequeno, a interação do campo eletromagnético com as componentes do meio envolve outros fatores, como, por exemplo, o espalhamento de parte da energia, que trará nova redução ao longo do percurso do campo.

Modernamente, o crescimento das frequências de ondas portadoras em comunicações inclui até valores na região óptica do espectro eletromagnético. Sinais nessa faixa transmitidos na atmosfera estarão submetidos a todas essas causas de atenuação. Interação com partículas suspensas no ar, como gotas de água, agrupamento de moléculas de gases e poeira em suspensão, que levam à absorção e ao espalhamento da energia.

As amplitudes dos campos que constituem a onda eletromagnética decrescem exponencialmente com a distância. Em análises de fenômenos ópticos, é conveniente estender o tratamento para avaliação da respectiva intensidade de irradiação, proporcional ao quadrado do campo elétrico ou ao quadrado do campo magnético. Nesta condição, o comportamento corresponde à denominada *lei de Beer-Lambert*, representada na forma de um coeficiente de transmissão que relaciona a intensidade em uma distância qualquer com a intensidade em um local de referência. Sua representação matemática tem a forma [45]:

$$T(R) = \frac{S(R)}{S(0)} = e^{-\alpha_p R} \quad (4.1)$$

sendo  $R$  a distância especificada, usualmente expressa em quilômetros (km),  $T(R)$  é a transmissão a essa distância (expressa em valores numéricos ou em porcentagem),  $S(0)$  é a densidade de potência óptica em uma distância de referência,  $S(R)$  é a densidade de potência óptica a uma distância  $R$  a contar da referência. Uma vez que esta equação estabelece a relação entre potências,  $\alpha_p$  é o *coeficiente de extinção ou fator de absorção* em nepers por unidade de distância e corresponde ao dobro do valor encontrado para o campo. Sua unidade deve ser compatível com a adotada para a especificação de  $R$ . É habitual expressar esta relação em decibels tomando-se:

$$L_{atm}(\text{dB}) = 10 \log \left[ \frac{S(0)}{S(R)} \right] = 10 \log e^{\alpha_p R} = 4,343 \alpha_p R \quad (4.2)$$

O coeficiente de extinção inclui quatro parcelas distintas, resultante da superposição de processo do espalhamento e de absorções causadas por aerossóis e moléculas de gases suspensas no ar. Assim, deve-se expressar este coeficiente por:

$$\alpha_p = \alpha_a + \alpha_m + \alpha_s + \alpha_c \quad (4.3)$$

onde,  $\alpha_a$  e  $\alpha_m$  representam os coeficientes de absorção por aerossóis e moléculas, respectivamente,  $\alpha_s$  e  $\alpha_c$  são coeficiente originados por espalhamentos em aerossóis e moléculas.

Se for escolhido um comprimento de onda em uma faixa com pequena absorção na atmosfera (janela de baixa absorção), o coeficiente de absorção molecular  $\alpha_m$  será muito pequeno e em muitos enlaces pode ser desconsiderado. Resultados de ensaios mostram que  $\alpha_s > \alpha_a$ , indicando que as partículas em suspensão espalham mais do que absorvem a luz. Portanto, o coeficiente de extinção é dominado pelo coeficiente de espalhamento das partículas [45].

## 4.2 Absorção atmosférica

**(a) Fatores que influenciam na absorção.** O fator de absorção depende de componentes na atmosfera e de suas concentrações. Esses elementos incluem as moléculas dos gases, as partículas em suspensão, o vapor d'água, componentes de poluição, a neblina e o nevoeiro, e assim por diante. As condições ambientais afetarão a propagação, com efeitos que dependem da frequência e do tipo de mudança no meio. Assim, uma atmosfera seca implica determinado efeito

e o aumento da umidade trará outras conseqüências. Se a propagação ocorrer em uma chuva, os efeitos dependem de outras condições, como a taxa de precipitação durante a transmissão. Todos estes fatores reduzem o nível do sinal transmitido por absorção e por espalhamento do sinal no ambiente. Estes efeitos serão avaliados em separado, com objetivo de computar suas ações sobre o feixe óptico modulado.

**(b) Descrição do fenômeno.** Como a absorção atmosférica é resultado da interação da luz com partículas suspensas no ar, parte de sua energia é absorvida e transformada em calor. Outra é espalhada em diferentes direções, levando a uma redução nos valores relativos à trajetória original. Existem dois tipos de absorção na atmosfera: absorção molecular e absorção por aerossóis, diferenciado principalmente pelas dimensões envolvidas nos componentes causadores do fenômeno. A absorção molecular resulta da interação do feixe de luz com os componentes da atmosfera, que incluem o vapor de água ( $H_2O$ ), oxigênio ( $O_2$ ), gás carbônico ( $CO_2$ ) e ozônio ( $O_3$ ). Essas absorções causam grandes atenuações em certos comprimentos de onda do infravermelho. Em comprimentos de onda entre 700nm e 1600nm, região do espectro conhecida como infravermelho próximo, há grandes influências das moléculas de água. Os comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm apresentam baixa absorção nas moléculas de água [10][46], o que os recomendaria para comunicações pelo espaço aberto. A absorção por aerossóis refere-se a partículas de poeira, gotículas de água, pequenos blocos de neve suspensas no meio. São componentes de dimensões maiores do que as moléculas constituintes do meio, com valores típicos entre 10nm e 100000nm.

A Figura 4.1 ilustra o comportamento típico da transmitância do feixe óptico na atmosfera, em porcentagem, para diferentes comprimentos de onda. A transmitância determina a capacidade de a atmosfera transmitir luz. Por exemplo, entre 550nm e 7500nm praticamente não há transferência de sinais por causa da grande atenuação causada por moléculas de água, fato que se repete em outros comprimentos de onda. Em comprimentos de onda usuais em comunicações ópticas, ao redor de 1000nm, pode-se esperar uma razoável transmitância, com uma média da ordem de 60% até 1300nm e cerca de 80% em 1750nm. Este comportamento não é homogêneo em toda a faixa, pois entre 1300nm e 1500nm existem algumas linhas do espectro nas quais ocorrem enormes absorções, principalmente por moléculas de água. Entretanto, em comprimentos de onda ao redor de 1550nm o efeito de atenuação pelo vapor d'água é bem

menor. Comprimentos de onda entre 8000nm e 13000nm sofrem menos efeitos da atmosfera, do ponto de vista da absorção, podendo apresentar uma transmitância média até superior a 60%.

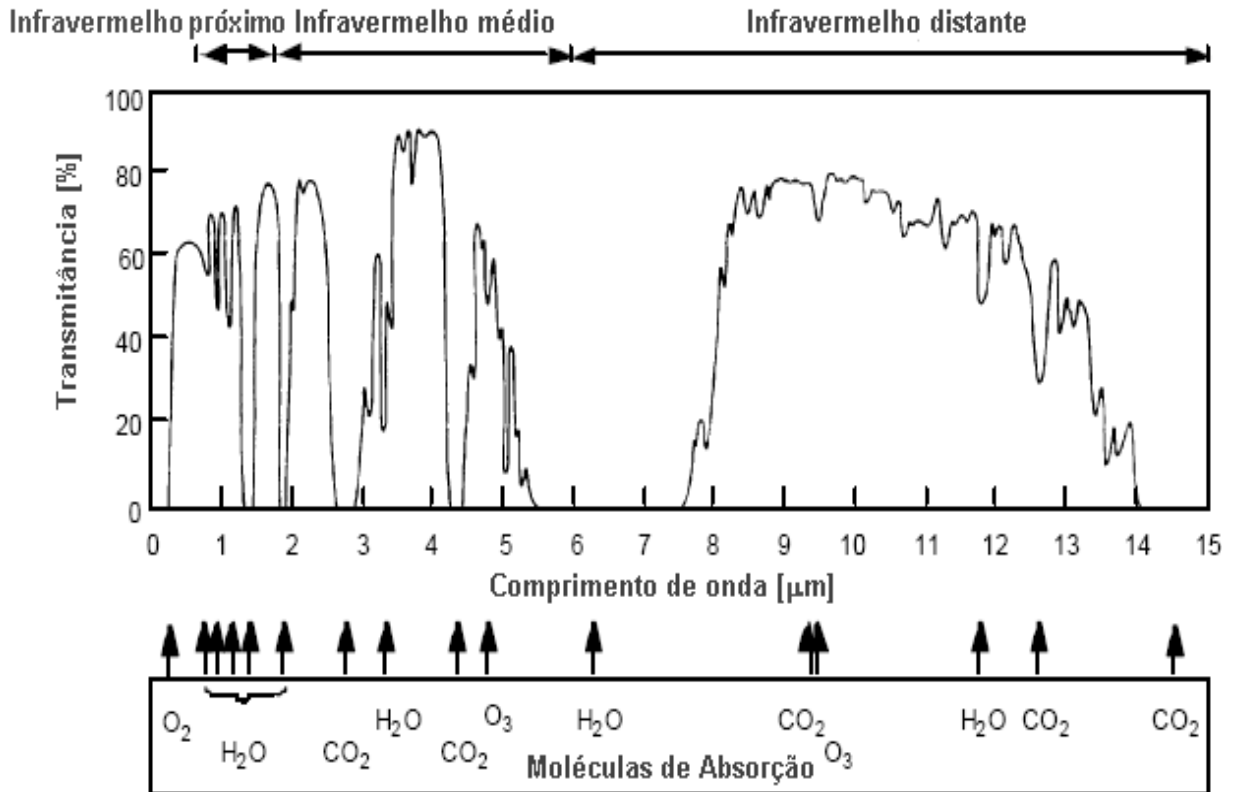


Fig. 4.1. Transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda, destacando as principais causas da atenuação [10].

### 4.3 Espalhamento atmosférico

(a) **Descrição geral.** A neblina é uma condição da atmosfera que afeta de maneira substancial as comunicações ópticas sem fio, envolvendo processos de absorção e espalhamento da luz. O espalhamento causa o redirecionamento de parte da energia incidente em partículas em suspensão. Logo, a intensidade da luz sofre redução, uma vez que a energia passa a ser distribuída em uma área que cresce com a distância percorrida. Existem diferentes mecanismos que levam a este processo, conforme as dimensões das partículas envolvidas em relação ao comprimento de onda. Levando em consideração estas particularidades, é definido o *parâmetro de tamanho*  $x_0$ , um número adimensional que relaciona o raio da partícula espalhadora com o comprimento de onda, representado por [11][13]:

$$x_0 = 2\pi r / \lambda \quad (4.4)$$

onde  $r$  é o raio da partícula,  $\lambda$  é o comprimento de onda. Para  $x_0 \ll 1$  tem-se o chamado de *espalhamento de Rayleigh* e para  $x_0 \sim 1$  identifica-se o *espalhamento de Mie*. Caso contrário, para  $x_0 \gg 1$  o espalhamento pode ser analisado usando óptica geométrica e costuma ser identificado como *não-seletivo*.

Comparado aos comprimentos de onda do infravermelho dos sistemas ópticos no espaço aberto, o raio médio de partículas do nevoeiro tem dimensão próxima a esses comprimentos. Esta é a razão pela qual o nevoeiro e a neblina são os principais fatores de atenuação. As partículas de chuva e de neve são maiores e, em teoria, representam obstáculos com menores influências sobre a propagação. A Tabela 4.1 indica raios aproximados das partículas na atmosfera e seus respectivos parâmetros de tamanho para comprimentos de onda de 785nm e 1550nm, interesse em sistemas ópticos no espaço aberto.

**Tabela 4.1.** Partículas responsáveis pelo espelhamento do feixe óptico na atmosfera [16]

Tipo	Raio ( $\mu\text{m}$ )	Parâmetro de tamanho $x_0$	
		785nm	1550nm
Moléculas do ar	0,0001	0,0008	0,0004
Partículas da neblina	0,1 a 1	0,08 - 8	0,04 - 4
Gotículas de nevoeiro	1 - 20	8 - 160	4 - 80
Chuva	100 - 10000	800 - 80000	400 - 40000
Neve	1000 - 5000	8000 - 40000	4000 - 20000
Granizo	5000 - 50000	40000 - 800000	20000 - 400000

**(b) O Espalhamento de Rayleigh.** É causado principalmente por moléculas dos gases atmosféricos quando os raios das partículas forem muito menores que o comprimento de onda do feixe ( $r \ll \lambda$ ). A atenuação originada por este fenômeno é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda ( $\sim \lambda^{-4}$ ). Portanto, quanto menor o comprimento de onda incidente, maior é a quantidade de energia removida do feixe principal. Assim, a luz azul é mais espalhada que a vermelha, por apresentar menor comprimento de onda. No infravermelho próximo, de interesse nos sistemas ópticos no espaço aberto, os efeitos do espalhamento de Rayleigh não são significativos [46].

**(c) O espalhamento de Mie.** Ocorre, principalmente, quando os raios das partículas atmosféricas forem da mesma ordem de grandeza ou maiores do que o comprimento de onda [13][47]. À medida que os tamanhos das partículas aproximam-se do comprimento de onda do feixe óptico, o espalhamento por partículas grandes torna-se mais dominante na direção original da

onda incidente do que na direção da onda refletida. O espalhamento de Mie é resultado da interação de infravermelho com as partículas da neblina, poeira, neve, etc.. É um fator de grande importância na avaliação da perda do feixe propagante e a neblina é um dos fatores que mais degrada os feixes ópticos.

**(d) O espalhamento geométrico ou não-seletivo.** Esta contribuição para a perda de potência ocorre quando as partículas atmosféricas tiverem dimensões muito maiores do que o comprimento de onda da portadora óptica. É chamado de *não-seletivo* porque não possui dependência do fator de atenuação com o comprimento de onda ou essa dependência apresenta-se como uma variação muito lenta. Aparece nas camadas mais baixas da atmosfera e são causados principalmente por: gotas de chuva, neve, granizo, neblina densa.

#### 4.4. Efeitos da neblina

O nevoeiro e a neblina são condições atmosféricas que afetam muito o desempenho de comunicações ópticas sem fio, pois causam diferentes tipos de espalhamento em vários comprimentos de onda. A neblina é composta de gotículas de água muito finas, com dimensões inferiores a um décimo de milímetro [48]. Forma-se pela condensação do vapor d'água no ar, nas proximidades do solo. Reduzem a visibilidade, pois são suficientemente numerosas para dar um aspecto opaco na atmosfera. Portanto, são capazes de modificar as características de propagação da luz, dificultar sua passagem devido à absorção, ao espalhamento e a múltiplas reflexões e refrações.

As condições meteorológicas nas quais a visibilidade horizontal próxima ao solo varia entre zero e várias centenas de metros são chamadas de *névoa ou nevoeiro*. É difícil de descrever fisicamente e há muitas discussões sobre suas características e propriedades de transmissão de sinais ópticos. Em vista destas dificuldades, adota-se a definição da Organização Meteorológica Mundial (WMO, *World Meteorological Organization*) que estabelece para o nevoeiro o limite de visibilidade até 1000m, característica de uma umidade relativa do ar próxima de 100% [49]. Quando a visibilidade for maior que 1000 metros, é a condição de *neblina*, segundo os critérios da mesma organização. Os conceitos de névoa ou nevoeiro são utilizados, também, para definir nuvens de partículas de fumaças, partículas de gelos ou mistura destes componentes. Apesar de a visibilidade caracterizar as condições de nevoeiros, outros critérios (o



tamanho e a densidade das partículas, por exemplo) descrevem estas condições de maneira mais quantitativa. Comunicações ópticas no espaço aberto usam principalmente dados de visibilidade por serem medidas bem confiáveis, feitas durante décadas, para diferentes aplicações, como as exigidas em aeroportos [50][51]. Essas medidas permitem que se caracterizem diferentes regiões e se desenvolvam estatísticas da disponibilidade para comunicações em FSO.

Nestas condições, define-se a *visibilidade* como a maior distância que um observador pode enxergar e reconhecer um objeto escuro tendo o céu como horizonte. Na terminologia técnica, é conhecida como *alcance visual*. Em 1957, a WMO definiu também o conceito de *alcance óptico meteorológico* (MOR, *Meteorological optical range*) [52]. Refere-se à distância percorrida na atmosfera para reduzir o fluxo luminoso de um feixe colimado proveniente de uma lâmpada incandescente com temperatura de cor de 2700K até 5% do seu valor original. Neste caso, o fator de atenuação da neblina é previsto utilizando um alcance estimado, relativo à visibilidade, para um limiar de transmissão de 5% do valor que seria obtido no espaço livre. Para a sua quantificação, foi desenvolvido um modelo matemático proposto por Kim e seus colaboradores [16]. Estabeleceram um cálculo aproximado do fator de extinção, em decibels por quilômetro (dB/km), segundo a expressão:

$$\alpha_p \cong \frac{13,03}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (4.5)$$

sendo  $\lambda$  o comprimento de onda em nanômetros (nm),  $V$  a visibilidade em quilômetros (km) especificada no comprimento de onda de 550nm, correspondente a intensidade máxima do espectro solar. Esta equação vale para visibilidades superiores a 500m. Até este limite, considera que a atenuação seja praticamente independente do comprimento de onda. A sua descrição indica que quanto menor for a visibilidade, maior será o fator de atenuação. O expoente  $q$  relaciona-se com a distribuição do tamanho das partículas na atmosfera e assume os seguintes valores, obtidos a partir de medições confiáveis:

$$q = \begin{cases} 1,6 & V > 50\text{km} \\ 1,3 & 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16V + 0,34 & 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \\ 0 & V < 0,5\text{km} \end{cases} \quad (4.6)$$

Em alguns estudos, o cálculo da atenuação prevê a redução da intensidade óptica para 2% do valor de emissão do corpo negro, conhecido como *critério de Koschmieder*, e haveria uma modificação no numerador de (4.5). Dado o fator de atenuação em (4.5) e aplicando o critério de Koschmieder, obtiveram-se as curvas de transmitância em função da visibilidade nos comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm. Utilizou-se (4.1) e os resultados foram como se representam na Figura 4.2.

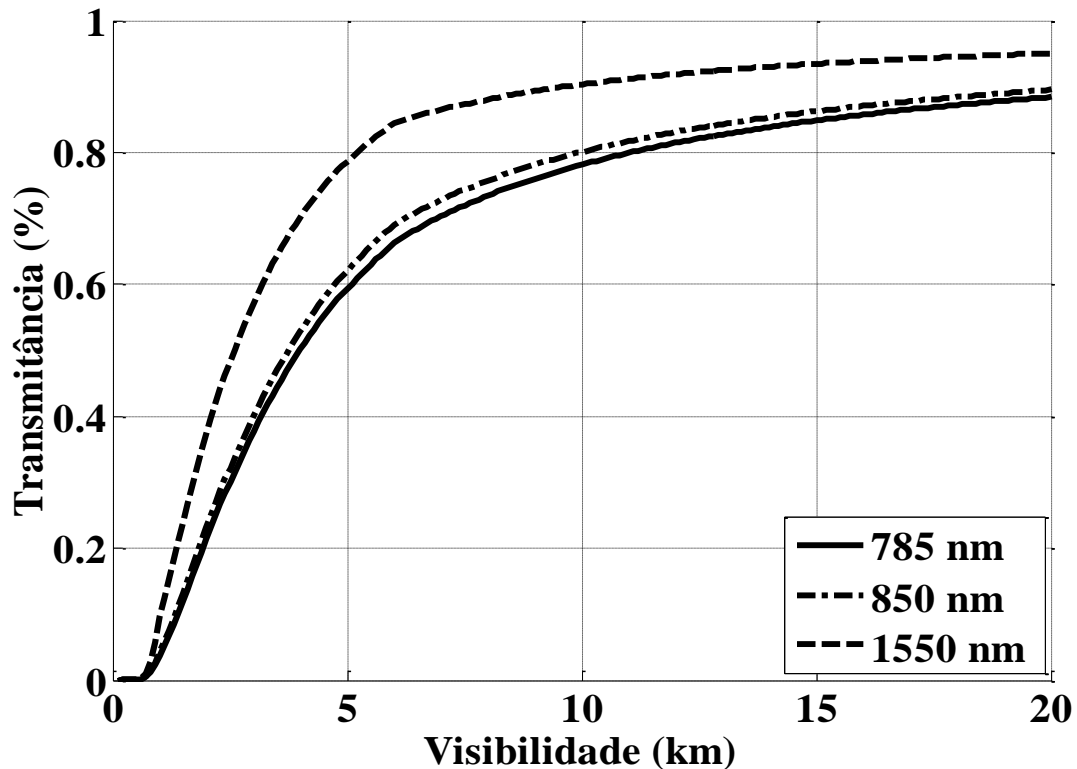


Fig. 4.2. Transmitância em função da visibilidade nos comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm.

Observa-se que o desempenho é maior no comprimento de onda de 1550nm, justificando a adoção desta portadora em muitos sistemas FSO. Como até cerca de 500m o fator de atenuação independe do comprimento de onda, justifica-se o comportamento mostrado na Figura 4.3. Nota-se que os fatores de atenuação nos comprimentos de ondas de 785nm e 850nm não diferem um do outro, permanecendo praticamente iguais em todos os pontos da visibilidade.

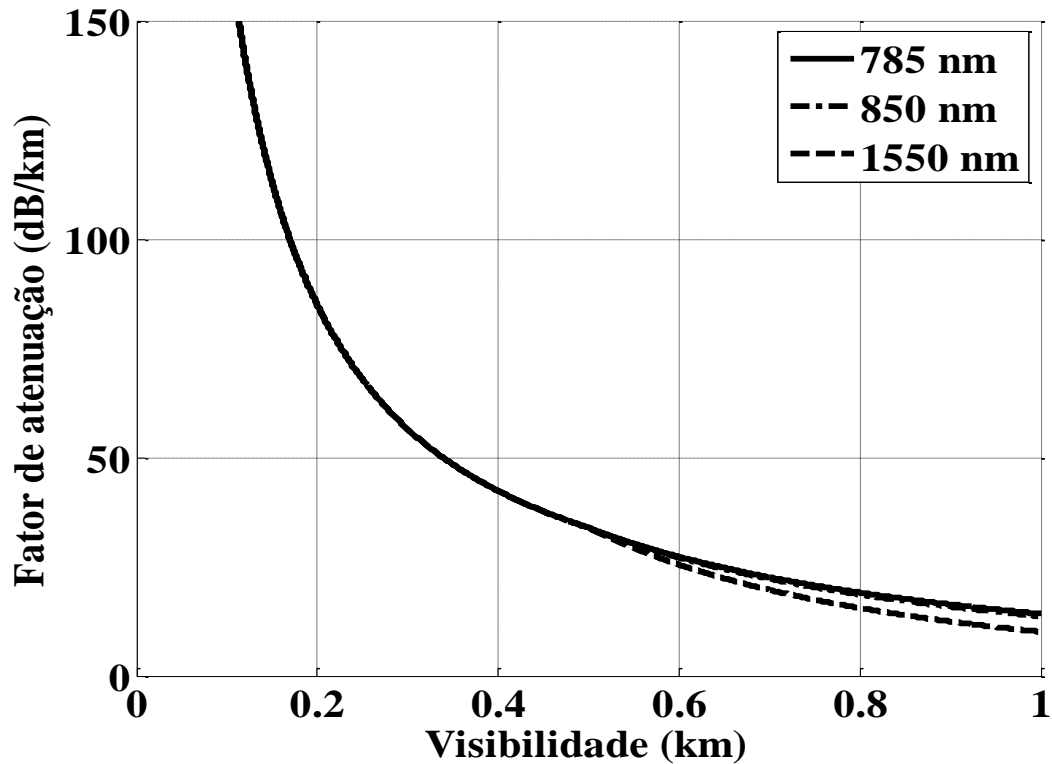


Fig. 4.3. Variação do fator de atenuação em função da visibilidade para vários comprimentos de onda.

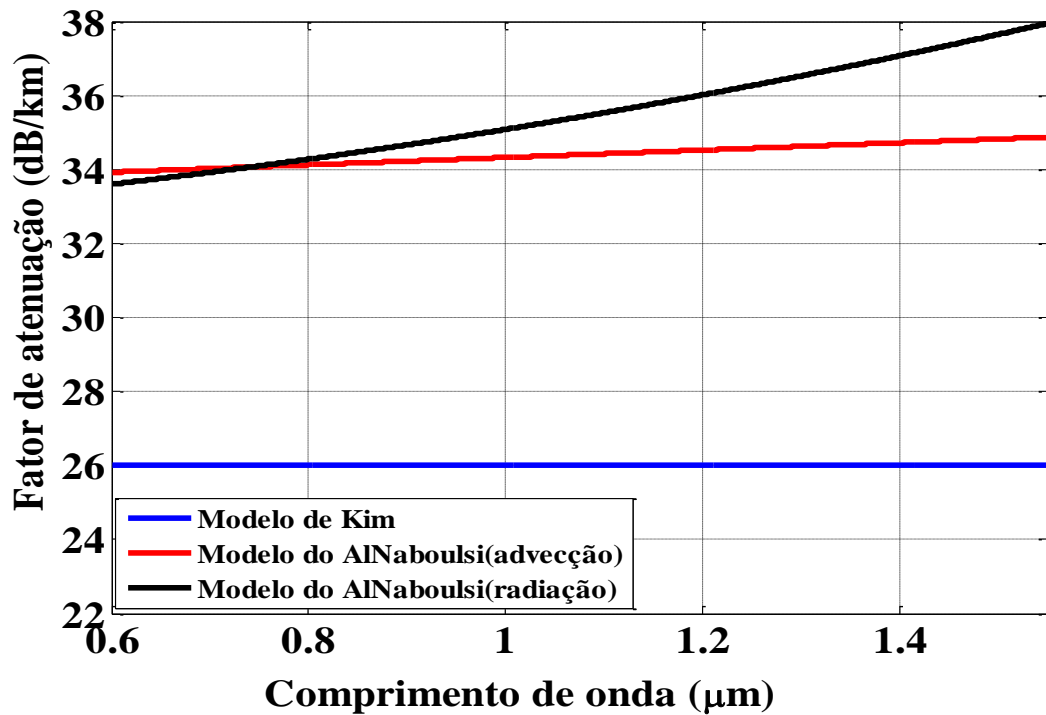
Existem alguns tipos de neblina que variam no tempo e no espaço. Os mais comuns são a *neblina continental* ou *de radiação* e a *neblina marítima* ou *de advecção* [48]. A neblina de radiação é gerada pelo resfriamento do solo em noites de céu limpo com ventos fracos. Ocorre quando a superfície libera o calor que acumulou durante o dia, tornando-se mais fria. O ar que estiver em contacto com a superfície é arrefecido abaixo do ponto de orvalho, provocando a condensação de vapor de água. A neblina de advecção é gerada quando o ar quente e úmido flui sobre uma superfície mais fria. Surge nas regiões próximas ao mar, quando as correntes frias e normais do oceano misturam-se e interagem com as regiões costeiras adjacentes. Também pode ocorrer em locais mais afastados da praia, especialmente no inverno. Esta neblina aparece quando a velocidade do vento chegar próxima de 5 m/s. É um valor suficiente para manter uma diferença de temperatura entre o ar e o solo, mas a esta velocidade não se produzem espalhamentos por turbulência da atmosfera.

Naboulsi e seus colaboradores desenvolveram modelos empíricos para a atenuação causada na neblina de radiação e de advecção [53]. As conclusões foram estabelecidas para comprimentos de onda entre 690nm e 1550nm, com visibilidades de 50m a 1000m. Utilizando a lei de Beer-Lambert, com o comprimento de onda expresso em nanômetros, os fatores de atenuação da neblina originada por radiação ou advecção são dados, respectivamente, por:

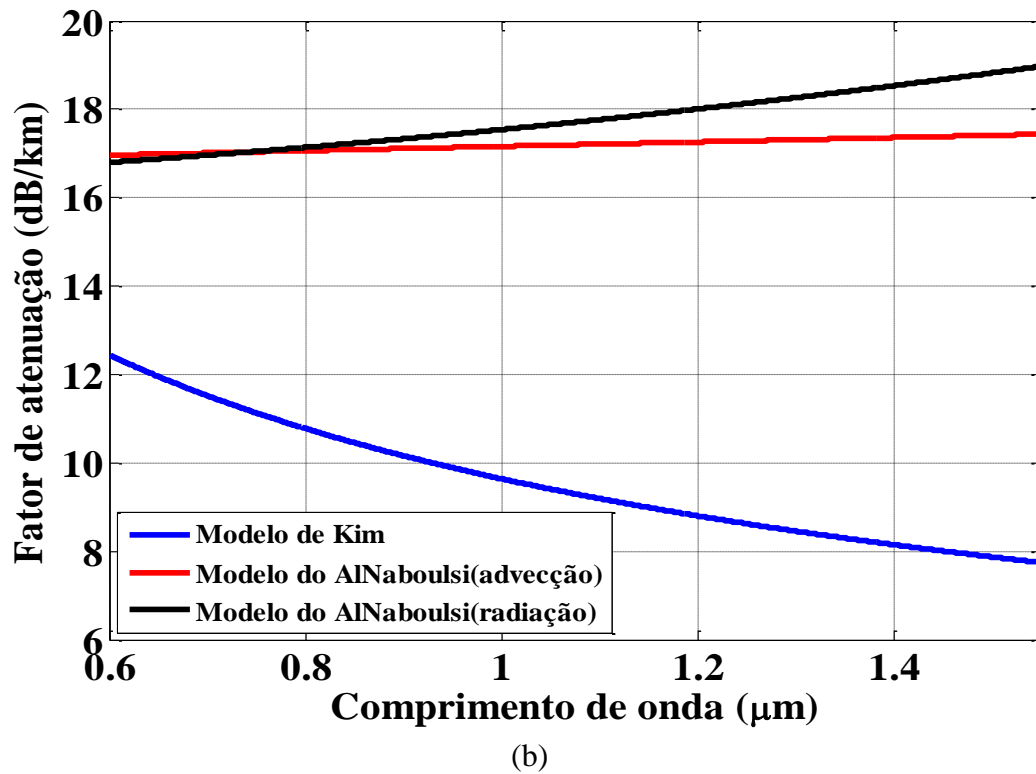
$$\alpha_{rad} = 10 \ln \left( \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V} \right) \quad (4.7)$$

$$\alpha_{adv} = 10 \ln \left( \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7205}{V} \right) \quad (4.8)$$

Os fatores de atenuação da neblina obtidos destas equações estão representados na Figura 4.4. Na Figura 4.4(a), o fator de atenuação para o modelo de Kim é constante, devido à sua independência em relação ao comprimento de onda quando a visibilidade for menor que 500m. Portanto, a previsão de Kim indica melhor desempenho do que os previstos em (4.7) e (4.8). Segundo estas expressões, há um acréscimo no fator de atenuação para maiores comprimentos de onda, supondo a visibilidade especificada em 1km.



(a)



**Fig. 4.4.** Comportamento do fator de atenuação em função do comprimento de onda com visibilidade de 500m e 1km. (a) Variação do fator de atenuação para a visibilidade de 500m, (b) Variação do fator de atenuação com visibilidade de 1km.

As características ópticas dos aerossóis, em particular da neblina, estão relacionadas com a distribuição estatística de tamanho das partículas [54], um parâmetro fundamental na obtenção de suas propriedades físicas e ópticas. Esta distribuição é representada por funções analíticas, como, por exemplo, a distribuição log-normal para aerossóis. É usual, também, adotar-se a distribuição gama modificada, mais conveniente para a distribuição dos tamanhos de partículas de formatos aproximadamente esféricos ou não-homogêneos [55][56]. Para neblina e nuvens, uma função analítica empregada é

$$n(r) = a r^{\alpha_d} \exp(-br) \quad (4.9)$$

onde  $n(r)$  é o número de partículas por unidade de volume e por unidade de incremento do raio  $r$ ,  $a$ ,  $\alpha_d$  e  $b$  são os parâmetros que caracterizam a distribuição do tamanho das partículas, sendo  $\alpha_d$  um valor inteiro. O valor de  $r$  para o qual a distribuição torna-se máxima é denominado *raio modal*. A Tabela 4.2 apresenta valores dos parâmetros para a neblina de advecção forte e para a neblina de radiação moderada. Utilizou-se a distribuição gama modificada para modelar os efeitos destes dois tipos de neblina na transmissão pela atmosfera.

**Tabela 4.2.** Distribuição do tamanho das partículas [56]

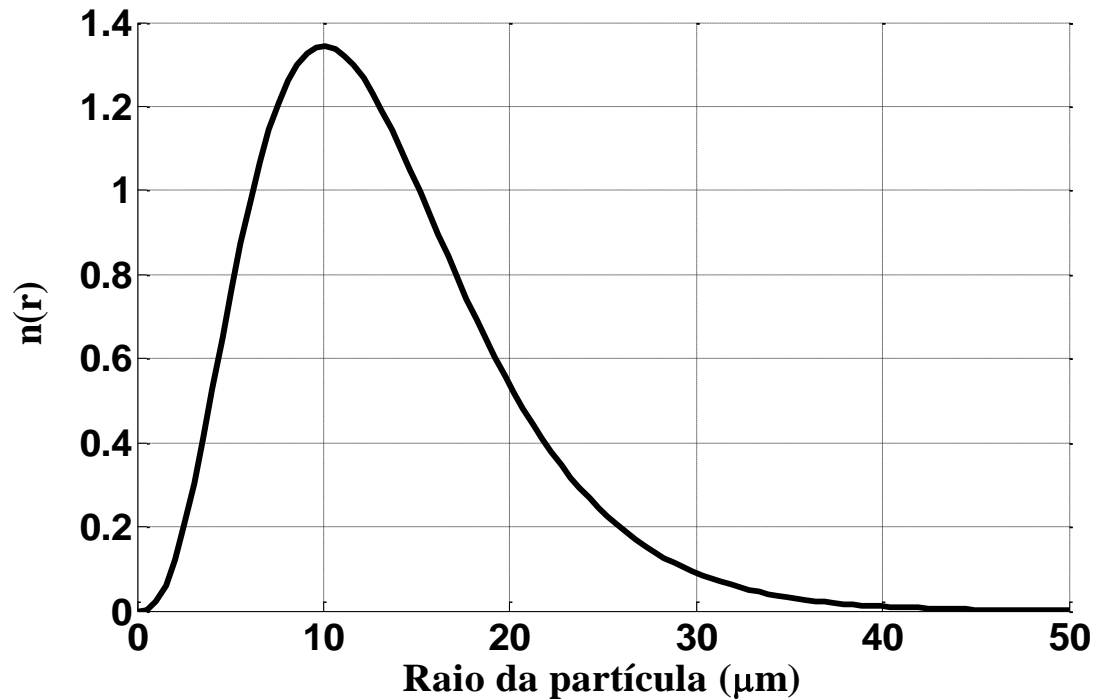
Tipo de Neblina	$a$	$\alpha_d$	$b$	$r(\mu\text{m})$
Advecção densa	0,027	3	0,3	10
Radiação moderada	607,5	6	3	2

Derivando-se (4.9) em relação a  $r$  e igualando o resultado a zero, encontra-se o raio para o qual se tem a máxima distribuição. Este valor e o máximo para  $n(r)$  são:

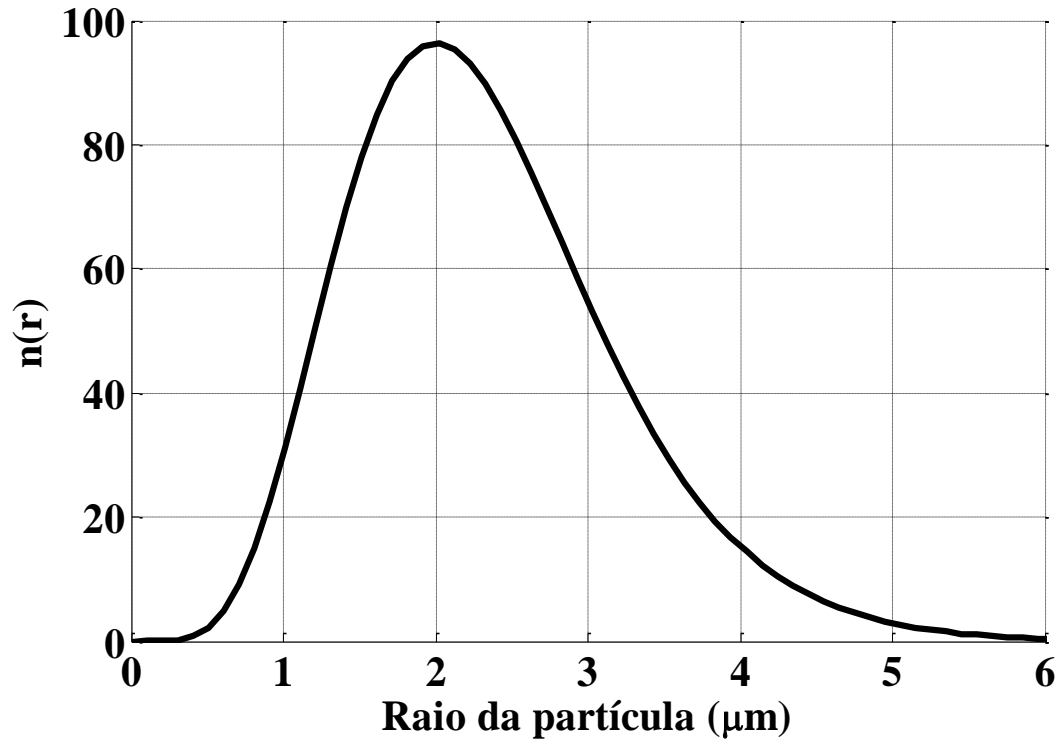
$$r_{dm} = \frac{\alpha_d}{b} \quad (4.10)$$

$$n_{m\acute{a}x} = a \left( \frac{\alpha_d}{eb} \right)^{\alpha_d} \quad (4.11)$$

onde  $e$  representa a base dos logaritmos naturais. A Figura 4.5 ilustra a distribuição do tamanho das partículas conforme (4.9) e com os parâmetros da tabela anterior. Na parte (a) têm-se resultados para a neblina de advecção forte e em (b) tem-se neblina de radiação moderada.



(a)



(b)

**Fig. 4.5.** Distribuição do tamanho das partículas com diversos parâmetros. (a) neblina de advecção densa, (b) neblina de radiação moderada.

Foi feita uma análise estatística a partir de experimentos realizados na Europa, nas cidades de Graz (Áustria) e Milão (Itália) [48]. Os objetivos foram medir e estudar a atenuação do feixe óptico em condições de neblina para diferentes graus de umidade e de temperatura. Ficou demonstrado que as influências ambientais levam ao comportamento semelhante a uma distribuição gaussiana, em função da temperatura e da umidade. Esses estudos estatísticos permitiram formular o fator de atenuação sob as condições de neblina da forma [48]:

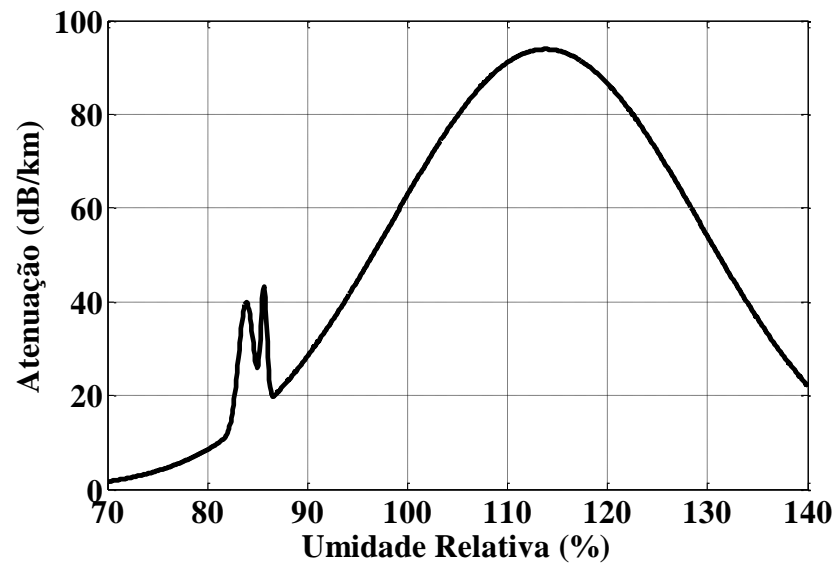
$$\alpha = a_1 e^{-[(x-b_1)/c_1]^2} + a_2 e^{-[(x-b_2)/c_2]^2} + a_3 e^{-[(x-b_3)/c_3]^2} \quad (4.12)$$

equação que resume os efeitos da umidade relativa e da temperatura. Os valores de  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  foram determinados empiricamente e estão na Tabela 4.3. De acordo com a proposta, a mesma equação deve descrever os efeitos de umidade e de temperatura. Estes valores, com as correspondentes constantes, são modificados através do parâmetro  $x$ . Isto é,  $x$  representa a umidade ou a temperatura.

**Tabela 4.3.** Valores dos coeficientes da umidade relativa e da temperatura

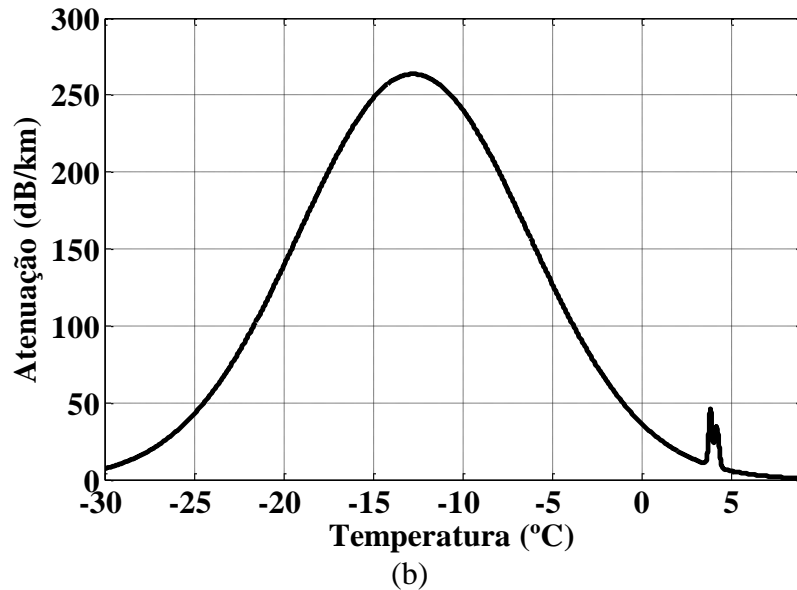
Coeficientes da umidade relativa	Coeficientes da temperatura
$a_1 = 25,75(14,98; 36,52)$	$a_1 = 36,04(32,36; 39,72)$
$b_1 = 83,85(82,69; 85,01)$	$b_1 = 3839(3,826; 3,852)$
$c_1 = 1,026(-0,7717; 2,824)$	$c_1 = 0,1298(0,09624; 0,1634)$
$a_2 = 93,89(-2568; 2756)$	$a_2 = 26,16(23,65; 28,66)$
$b_2 = 113,8(-242,2; 469,9)$	$b_2 = 4,189(4,171; 4,207)$
$c_2 = 21,77(-80,5; 123,6)$	$c_2 = 0,1722(0,1428; 0,2017)$
$a_3 = 24,46(-2,335 \times 10^5; 2,335 \times 10^5)$	$a_3 = 263,7 (-7976; 8504)$
$b_3 = 85,64(-903,2; 1075)$	$b_3 = -12,74(-158,4; 132,9)$
$c_3 = 9,071(-27-8,11; 46,25)$	$c_3 = 9,071(-28,11; 46,25)$

É usual especificar-se a umidade em porcentagem comparada com a condição de saturação do ambiente. Esta saturação indica que o ar não tem mais condições de absorver água e a concentração de moléculas de água que passa da fase líquida para vapor é igual à concentração de moléculas que passa da fase de vapor para a fase líquida. Tomando a umidade relativa como variável, constataram-se grandes modificações quando seu valor varia entre 83% e 87%, para temperatura ambiente acima de 5°C. Ou seja, nesta faixa de umidade a atenuação difere do levantamento feito com base na distribuição gaussiana. Quando se fixou a umidade relativa, verificou-se, novamente, um comportamento gaussiano para o fator de atenuação, exceto entre 3,5°C e 4,5°C. Estas descrições estão representadas nas partes (a) e (b) da Figura 4.6, respectivamente.



(a)





**Fig. 4.6.** Comportamento da atenuação. (a) variação da atenuação com relação à umidade relativa, (b) Variação da atenuação em função da temperatura.

Portanto, sob condições de grandes dispersões em relação ao comportamento gaussiano, a Equação (4.12) não é mais confiável [48]. Na Figura 4.6(a), a umidade relativa do meio foi até 140% para a visualização do comportamento do formato gaussiano. Com o limite em 100% a curva final ficaria incompleta.

## 4.5 Atenuação por chuva

Os enlaces do sistema FSO são influenciados pela chuva, embora sua contribuição na perda de potência seja menor do que os da neblina, nuvem e nevoeiro. Admitindo as gotas de chuva com formato aproximadamente esférico, estimam-se seus raios entre 200000nm a 2000000nm. São valores maiores do que os comprimentos de onda dos feixes ópticos nesses enlaces. Dependendo da concentração de gotas e da precipitação, a chuva degrada mais os comprimentos de onda nos quais a absorção por  $H_2O$  for alta. Na faixa de comunicações ópticas, há alguns comprimentos de onda com grande absorção entre 1000nm e 2000nm. Por isto, esta forma de atenuação enquadra-se em um comportamento semelhante ao do espalhamento não-seletivo.

Uma modelagem utilizada para avaliação da perda pela chuva, conhecida como *coeficiente de espalhamento por chuva*, envolve a taxa de precipitação  $R_p$  (em milímetros por hora), segundo a expressão [10]:

$$A_{ch} = a R_p^b \quad (4.13)$$

sendo  $a$  e  $b$  coeficientes de ajuste que dependem das características da precipitação e da região em que se encontra o enlace. Os coeficientes são escolhidos para o resultado ser expresso em decibels por quilômetro (dB/km). Se não estiverem disponíveis informações para a região, sugere-se o emprego de valores médios correspondentes a  $a = 1,076$  e  $b = 0,67$  [57]. A Tabela 4.4 relaciona as condições do tempo com a taxa de precipitação que causa visibilidades semelhantes, com os valores estimados e suas respectivas perdas típicas.

**Tabela 4.4.** Código internacional de visibilidade para as condições do tempo e precipitação [11][16]

Condições do tempo	Tipo de precipitação	Precipitação (mm/h)	Visibilidade	Perda (dB/km)
Nevoeiro denso			0 m	
			50m	315,0
Nevoeiro grosso			50 m	315,0
			200 m	75,3
Nevoeiro moderado			200 m	75,3
			500 m	28,9
Nevoeiro leve	Tempestade	100	500 m	28,9
			700 m	18,3
			1 km	13,8
Nevoeiro fino	Chuva forte	25	1 km	13,8
			1,9 km	6,9
			2 km	6,6
Neblina	Chuva média	12,5	2km	6,6
			2,8 km	4,6
			4 km	3,1
Neblina fina	Chuva fraca	2,5	4 km	3,1
			5,9 km	2
			10 km	1,6
Limpo	Garoa	0,25	10 km	1,6
			18 km	0,6
			20 km	0,54
Muito limpo			20 km	0,24
			23 km	0,47
			50 km	0,19

Observa-se que o nevoeiro denso, o grosso e o nevoeiro moderado causam maiores reduções na visibilidade do que as tempestades e apresentam perdas muito elevadas. Uma das razões é o fato de este tipo de fenômeno ser mais estável na atmosfera, permanecendo por mais tempo no ar do que as gotas de chuva. Neste caso, um enlace de FSO com margem de sinal adequadamente especificada para operar sob nevoeiro não deve enfrentar problemas sob condições de chuva forte. Então, a neblina ainda é um fator muito prejudicial nos enlaces, por causa das elevadas perdas por absorção e espalhamento da portadora óptica. A Figura 4.7 ilustra o comportamento da atenuação causada pela chuva em função da precipitação (4.13) e ve-

rifica-se que maior intensidade da chuva implica crescimento na atenuação. Um dado a se observar é que sistemas de radiocomunicações em microondas podem operar em frequências acima de 10GHz e sofrem influência mais significativa pela chuva do que pela neblina. A justificativa relaciona-se ao fato de o comprimento de onda estar mais próximo do raio da gota de chuva e com valores muito maiores do que das gotículas da umidade que compõe a neblina [10][58].

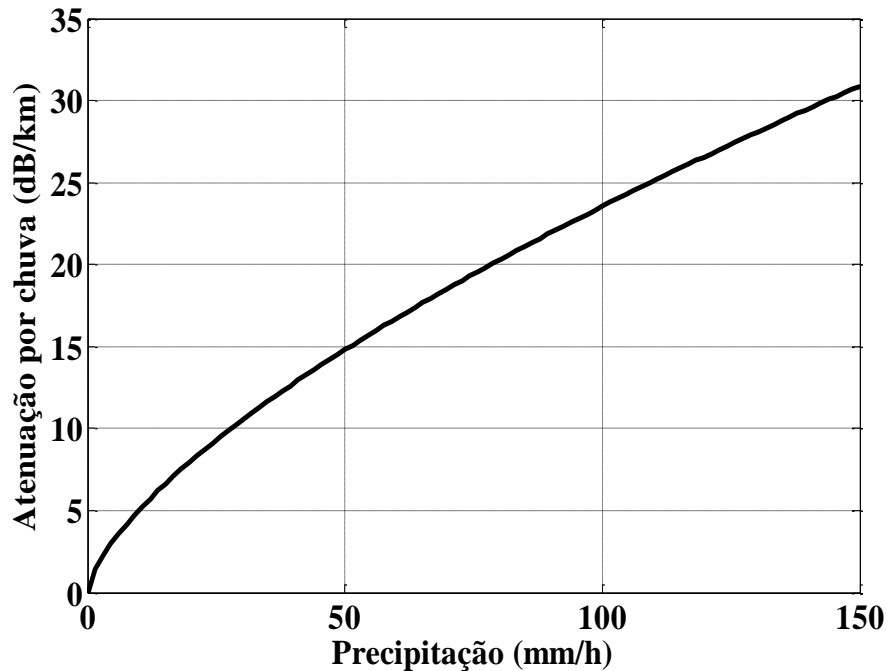


Fig. 4.7. Comportamento da atenuação da chuva em função da precipitação [10].

#### 4.6 Efeitos da turbulência atmosférica

Ao se propagar em um meio com características aleatórias, o feixe óptico sofre outros efeitos que levam à sua degradação. Em conseqüências de sua imprevisibilidade, esses efeitos limitam as comunicações ópticas, tanto no que concerne à distância como no que diz respeito à taxa de transmissão. Um efeito de comportamento imprevisível é a *turbulência atmosférica*. É causada pelo aquecimento da superfície da terra, aquecendo também o ar que esteja próximo a essa superfície. O aumento na temperatura do ar altera seu índice de refração com suas conseqüências sobre o feixe óptico propagante. Um dos efeitos da turbulência é a *cintilação*, causada pela presença de bolsas de ar com diâmetros menores do que o diâmetro do feixe óptico [46]. Essas pequenas bolsas são regiões pontuais nas quais ocorrem mudanças no índice de

refração. Portanto, haverá modificações na frente de onda originadas por refrações e difrações, com sérios efeitos sobre o desempenho das comunicações ópticas.

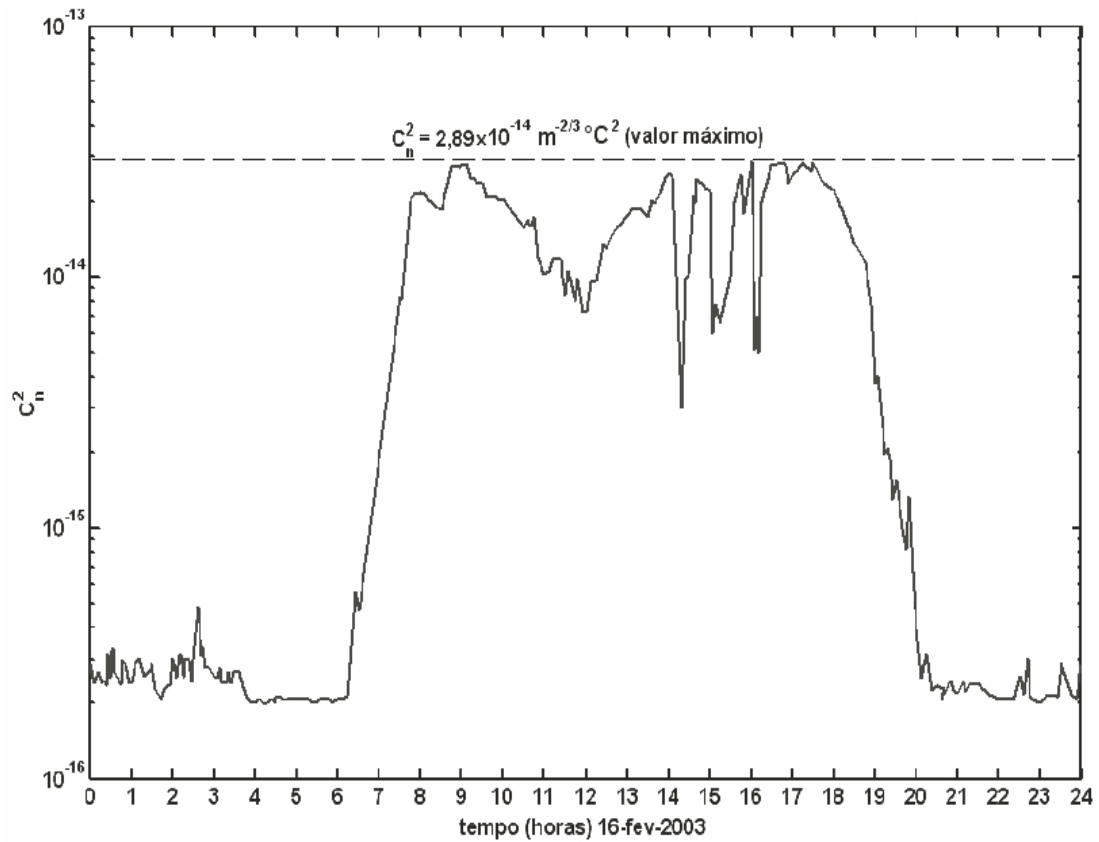
Como a turbulência tem um caráter aleatório, as avaliações sobre seus efeitos devem obedecer a um tratamento probabilístico. Por isto, costuma ser classificada com base na medida da variância da densidade superficial de potência instantânea para ondas planas, em escala logarítmica. Este parâmetro é conhecido como variância de Rytov e é determinado por [13][47]:

$$\sigma_1^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} R^{11/6} \quad (4.14)$$

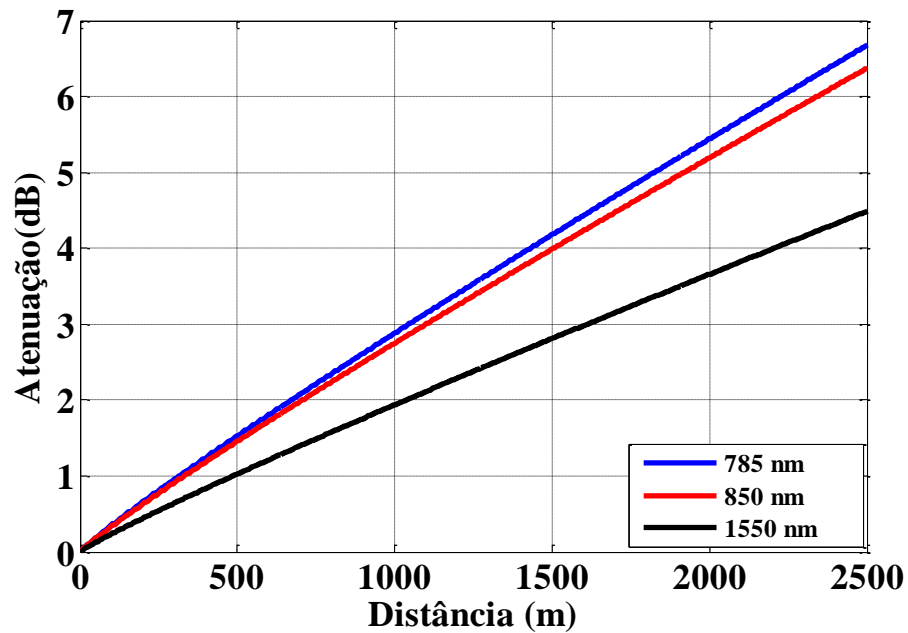
onde  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda do feixe em metro (m),  $R$  é a distância do enlace em metros (m),  $C_n$  é o parâmetro da estrutura do índice de refração relacionado à magnitude dos efeitos da turbulência na propagação. É conhecido como medida de intensidade da turbulência e tem-se a *turbulência fraca* quando  $\sigma_1 < 1$ . Quando for computado  $\sigma_1 \cong 1$ , identifica-se a *turbulência moderada* e se  $\sigma_1 \gg 1$  resulta na *turbulência forte*. A Equação (4.14) é válida somente para turbulências fracas e moderadas.

Foi feito um levantamento estatístico pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero) no Aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, em 16 de fevereiro de 2003. Com esse estudo, obtiveram-se os valores do parâmetro estrutural do índice de refração  $C_n$ . Durante o dia, foram medidos valores na ordem de 100 vezes maiores que os medidos à noite. A justificativa foi o fato de a principal causa da turbulência atmosférica ser o aparecimento das bolhas de ar aquecidas pelo sol. Quanto mais próximo da terra maior será o valor de  $C_n$ . A Figura 4.8 ilustra este comportamento.

A Figura 4.9 ilustra o comportamento da atenuação ocasionada pela cintilação nos comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm em função da distância, com valor de  $C_n$  igual a  $10^{-14}$ . Deduz-se que quanto maior o comprimento de onda menor será o efeito da cintilação no sinal óptico transmitido. Para os valores que foram especificados, o comprimento de onda de 1550nm apresentou menor atenuação em relação aos outros. Ou seja, um feixe óptico com comprimento de onda de 1550nm é menos susceptível aos efeitos da turbulência em relação aos comprimentos de onda menores.



**Fig. 4.8.** Variação do parâmetro estrutural do índice de refração medido no Rio de Janeiro no dia 16 de fevereiro de 2003 [25].

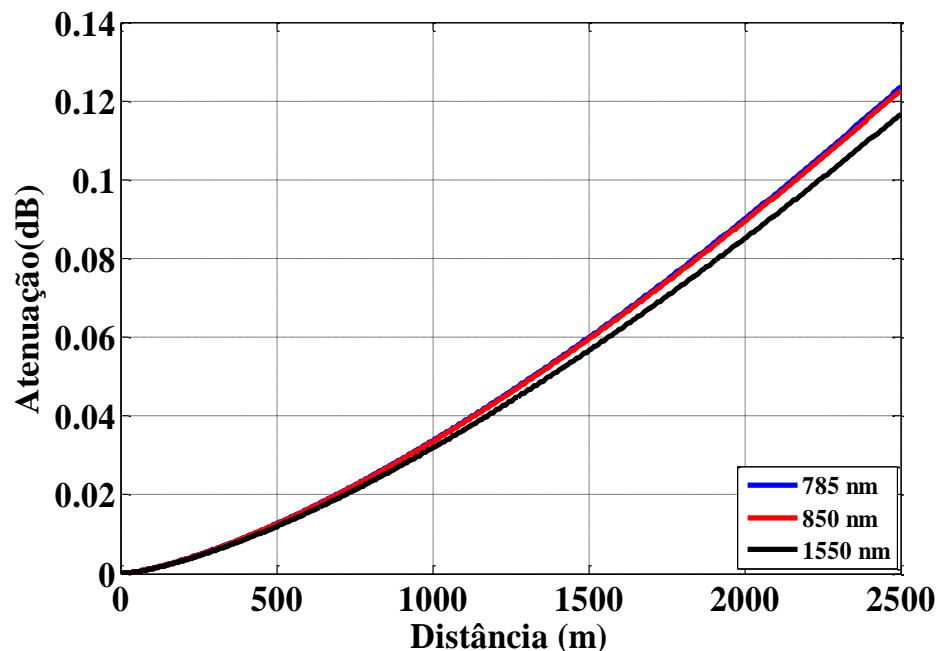


**Fig. 4.9.** Comportamento da atenuação devido à cintilação para os comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm em função da distância.

Além da cintilação a turbulência também provoca o *deslocamento aleatório do feixe*, com atuação mais significativa quando as bolsas de ar de diferentes índices de refração são maiores que o diâmetro do feixe. Essas bolsas de ar funcionam como lentes refletindo aleatoriamente o feixe, desviando-o de seu ponto focal, ainda que não altere o seu diâmetro de forma significativa. O deslocamento aleatório do feixe é o efeito da turbulência que menos afeta o desempenho do campo óptico transmitido, comparado com a cintilação. Análise deste efeito é feita através da variância radial de potência, dada por:

$$\sigma_r^2 = 1,83C_n^2\lambda^{-1/6}R^{17/6} \quad (4.15)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda em metro (m),  $R$  é a distância do enlace em metro (m) e  $C_n$  é o parâmetro estrutural relacionado ao índice de refração. A Figura 4.10 ilustra variação da atenuação provocada pelo deslocamento aleatório do feixe em função da distância, para diferentes comprimentos de onda. O gráfico foi traçado com o mesmo valor de  $C_n$  da Figura 4.9. Nota-se que a atenuação nos comprimentos de ondas de 785nm e 850nm não diferem um do outro, permanecendo praticamente iguais em todos os pontos. De novo, o comprimento de onda de 1550nm, apresenta menor atenuação em relação aos outros valores.



**Fig. 4.10.** Variação da atenuação devido ao deslocamento aleatório do feixe em função da distância nos comprimentos de onda de 785nm, 850nm e 1550nm.

## 4.7. Balanço de potência

As alterações no nível de potência são importantes na análise de qualquer enlace de comunicações. Permitem avaliar o alcance de um enlace a partir da potência transmitida, das perdas na propagação e da sensibilidade do receptor. Devem ser incluídas as perdas dos componentes nos lados do transmissor e do receptor, além das atenuações ao longo do canal de transmissão. Em um sistema de FSO, esta última parcela refere-se às perdas geradas na atmosfera e dependem das causas já apresentadas. Levando em consideração estes fatos, conclui-se que a potência que chega ao receptor corresponde ao valor obtido com:

$$P_{Rx} = P_{Tx} - \sum A_i - M_s \quad (4.16)$$

onde,  $P_{Tx}$  e  $P_{Rx}$  são as potências de transmissão e de recepção, respectivamente, expressas em dBm,  $A_i$  é a atenuação total do enlace, em decibels (dB) e  $M_s$  é a margem de segurança do sistema, em dB. A potência mínima aceitável na recepção é fixada pela sensibilidade do receptor no comprimento de onda utilizado e para a taxa de erro de bit desejada. Considerando as várias causas de perda em um enlace FSO, a atenuação total deve ser computada com [24] [25]:

$$\sum A_i = A_{Atm} + A_{ch} + A_{Cint} + A_{geo} + A_{Tx} + A_{Rx} + A_{desalin} \quad (4.17)$$

onde,  $A_{Tx}$  e  $A_{Rx}$  são as perdas em componentes de saída do transmissor e de entrada do receptor, dadas em dB,  $A_{Atm}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{Cint}$ ,  $A_{geo}$  e  $A_{desalin}$ , correspondem, as perdas causadas pelas atenuações atmosférica, por chuva, por cintilação, a perda geométrica e a atenuação por desalinhamento imperfeito, todas em dB. A margem de segurança do sistema é escolhida para garantir que o enlace permaneça funcionando mesmo quando os seus componentes apresentarem degradações por envelhecimento, por alterações na temperatura e por modificações nas condições previstas nos cálculos de propagação na atmosfera.

## 4.8. Dispersão e suas consequências

A diferença de duração de propagação entre os modos de propagação de um sinal óptico pode conduzir à dispersão do sinal. A dispersão ocorre em meios materiais, causada por atrasos na propagação de campos eletromagnéticos [59]. O sinal óptico modulado com uma sequência de pulsos pode apresentar aumento na taxa de erro de bit por causa da sobreposição dos pulsos adjacentes que sofreram deformação no percurso, fato identificado como interferência intersimbólica. Uma forma de mitigar esse problema é aumentar o espaçamento entre os

pulsos no domínio do tempo, diminuindo a taxa de transmissão. Portanto, a dispersão torna-se um sério inconveniente, uma vez que limita a capacidade do sistema [60].

#### **4.9 Comentários sobre o capítulo**

Descreveram-se as principais causas que degradam o feixe óptico na atmosfera, como a absorção e o espalhamento, que causam grandes atenuações em certos comprimentos de onda na faixa do infravermelho. Foi abordado o efeito da neblina e os tipos de neblina existentes na atmosfera, destacando os tipos mais comuns da neblina marítima e de advecção. Mostrou-se que se trata de uma condição atmosférica que mais degrada o enlace de comunicações ópticas no espaço aberto por possuir dimensões equivalentes aos comprimentos de onda utilizados. Apresentaram-se modelos empíricos do fator de atenuação na neblina, em destaques para os modelos de Kim e os de Nabousi para os diferentes tipos. O efeito da chuva e o efeito da turbulência atmosférica também foram descritos nesse capítulo. Embora, a chuva tenha um impacto insignificante no enlace FSO comparada à neblina, o seu efeito não deve ser desconsiderado. Foi analisado apenas o efeito da neblina no protótipo de um enlace FSO montado em laboratório. Os gráficos apresentados na parte teórica foram feitos com auxílio do programa de cálculo MATLAB®.



## Capítulo 5

### Resultados Experimentais

#### 5.1 Introdução

Serão apresentados os resultados dos ensaios em um enlace óptico no espaço aberto montado em laboratório, com a idéia principal de avaliar os efeitos da neblina. Os ensaios foram feitos em dois comprimentos de onda, para justificar o emprego do que apresentasse melhor desempenho no canal sem neblina e com neblina. Obtiveram-se as atenuações na neblina para diferentes graus de umidade do meio. Constatou-se que a atenuação cresce com o aumento da umidade relativa e buscou-se quantificar os resultados. Analisou-se a influência do meio sobre a dispersão temporal, com a medida da mudança na duração de pulsos ultracurtos e com a avaliação do diagrama de olho. Com a análise do diagrama de olho, obteve-se a taxa de erro de bit, (BER, *bit error rate*). O seu valor mostrou que o sinal é viável para a transmissão, considerando o limite do código de correção de erro (FEC, *forward error correction*). O tema é de relevância, tendo em vista avaliações de diversos trabalhos experimentais recentes, em vários meios e diferentes comprimentos de onda. [61][62][63].

#### 5.2 Montagem do enlace

A montagem empregada para os ensaios em laboratório está ilustrada na Figura 5.1. Na parte (a), tem-se o diagrama em blocos do sistema e em (b) a disposição dos componentes na bancada. O enlace tem extensão de 1,60 metros em uma mesa óptica de 2,5 metros de comprimento. Para o alinhamento do feixe óptico, foram utilizados dois espelhos de alumínio da Newport® e um laser visível no comprimento de onda de 532nm e com potência emitida de 50mW.



para 5mW. Ainda no transmissor, utilizou-se um laser verde no comprimento de onda de 532nm e um laser a fibra dopada com érbio (EDFL, *Erbium-Doped Fiber Laser*) operando em 1550nm. Também foi utilizada uma lente objetiva 10x da Newport para efetuar a colimação do feixe. Essa colimação é essencial para reduzir o espalhamento que ocorre durante a propagação do feixe. No receptor, uma lente objetiva de 10x capta o feixe e um medidor de potência óptica Thorlab<sup>®</sup> modelo MP100D informa a potência na saída do sistema. Foram utilizados um osciloscópio Keysight modelo DSOZ592A e um autocorrelator Femtochrome<sup>®</sup>, modelo FR- 103XL para as análises da largura de pulsos ultracurtos e do diagrama de olho. No receptor, foi utilizado um fotodetector do tipo *p-i-n* de arsenieto de gálio e índio modelo 818-BB-35F da Newport<sup>®</sup> para a recuperação do sinal elétrico. O meio de transmissão inclui uma caixa acrílica adaptada para receber a neblina, contendo duas aberturas, em lados opostos, para permitir a passagem do feixe óptico.

Para criar, quantificar e controlar a neblina inserida na caixa foi utilizado um umidificador de ar ultra-sônico da Techline, que forma partículas de aerossóis. Acrescenta-se, ainda, um termo-higrômetro Minipa modelo MT-241. Com este último aparelho mede-se a umidade relativa do meio. Para os ensaios utilizaram-se comprimentos de onda de 532nm (ainda na faixa visível) e 1550nm, com potências ópticas emitidas de 12,30dBm e 7,13dBm, respectivamente.

Os primeiros ensaios procuraram garantir a melhor recepção com o alinhamento e colimação do feixe, utilizando a transmissão de dados entre dois computadores. Os computadores foram ligados a conversores de mídia, que emitem comprimentos de onda 1550nm em uma extremidade e 1310nm na outra extremidade. O sinal elétrico empregado na transmissão modulava o feixe óptico e, após a propagação, era recuperado no lado do receptor e encaminhado para o computador. Verificava-se que a informação transmitida era reproduzida de maneira aceitável para os padrões exigidos em comunicações. A Figura 5.2 ilustra o enlace com os respectivos computadores e os conversores de mídia trocando as informações entre si. A transmissão foi feita com sucesso, pois foi possível constatar a troca de dados entre os computadores. Caso fosse inserido um obstáculo no espaço aberto entre o transmissor e o receptor, a transmissão era interrompida e após a sua retirada o enlace era restabelecido.



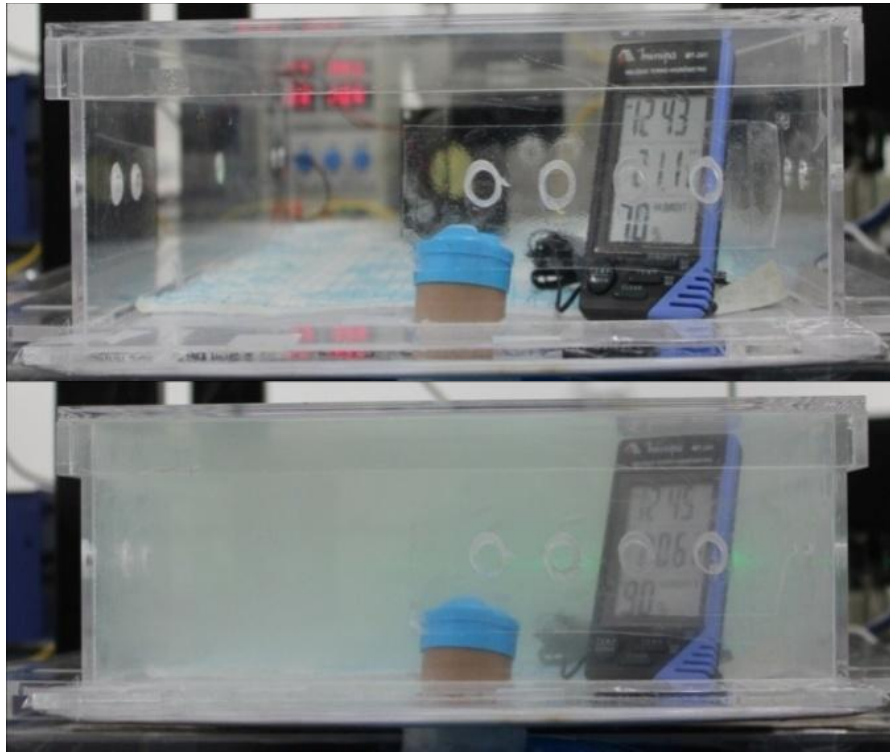
Fig. 5.2. Troca de informação entre dois computadores através do espaço aberto utilizando conversores de mídia.

### 5.3 Análises dos resultados

(a) **Avaliação das perdas na neblina.** Foi analisado o desempenho do enlace, com o canal sem neblina, usando os dois comprimentos de onda. Ao acoplar o feixe óptico na lente transmissora, a potência em sua saída foi de 11,75dBm. Com o feixe colimado e o melhor alinhamento, a potência na entrada da lente receptora em 532nm foi de 11,60dBm. Portanto, a perda no espaço sem quaisquer obstruções e na extensão de 1,60 metros foi de 0,15dB. Como a potência total na saída do sistema foi de 10,45dBm, a perda total no enlace foi de 1,85dB, incluindo todos os componentes e dispositivos envolvidos.

Para o comprimento de onda de 1550nm a potência na saída da lente transmissora foi de 6,46dBm. Após a colimação do feixe, a potência captada pela lente receptora foi de 6,28dBm, indicando perda no espaço aberto de 0,18dB. A potência medida na saída do sistema foi de 5dBm. Então, nestas novas condições, a perda total foi de 2,13dB. Embora na faixa visível a perda fosse ligeiramente menor, comprimentos de onda no infravermelho são mais utilizadas, uma vez que os equipamentos de alta velocidade da banda-C padronizada pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) são os mais usados em comunicações por fibras ópticas. A neblina afeta mais o desempenho das comunicações ópticas, por causar diferentes espalhamentos em vários comprimentos de onda. Mostrou-se que é composta de gotículas de água de pequeníssimas dimensões, com comprimentos e diâmetros entre 10nm e 100000nm, e reduzem a visibilidade por serem suficientemente numerosas para dar aspecto mais opaco à atmosfera.

Portanto, serão analisadas as conseqüências da neblina no sistema óptico no espaço aberto em uma transmissão com luz visível e no infravermelho próximo.



**Fig. 5.3.** Canal atmosférico sem neblina em 70% e com neblina em 90% de umidade relativa

Algumas medidas mostram que a neblina começa a surgir quando a umidade relativa do meio aproximar-se de 80% [48]. Com esta informação, o aparelho que cria o efeito da neblina (Ar umidificador) foi ligado quando a umidade relativa alcançou 70%, comprovada pelo equipamento mostrado na Fig. 5.3. Com a umidade de 70%, o interior da caixa permaneceu totalmente visível. Quando o aparelho de neblina for ligado e o termo-higrômetro indicar o máximo de 90% de umidade relativa, a caixa torna-se completamente coberta, mostrando pouca visibilidade.

Para os sucessivos acréscimos na umidade, até um máximo de 90%, eram medidas as potências na saída do sistema. Obtiveram-se as atenuações representadas na Figura 5.4. Para os dois comprimentos de onda, verificou-se que em escala linear o valor numérico da atenuação cresce de maneira quase exponencial com a umidade relativa. Portanto, em uma escala logarítmica (em decibels), o gráfico assume um comportamento praticamente linear. Em 1550nm, a atenuação na neblina apresenta melhor desempenho na maioria dos valores de umidade,

comparando os resultados com os correspondentes a 532nm. Trata-se, portanto, de um indicativo que a transmissão em infravermelho apresenta melhor desempenho.

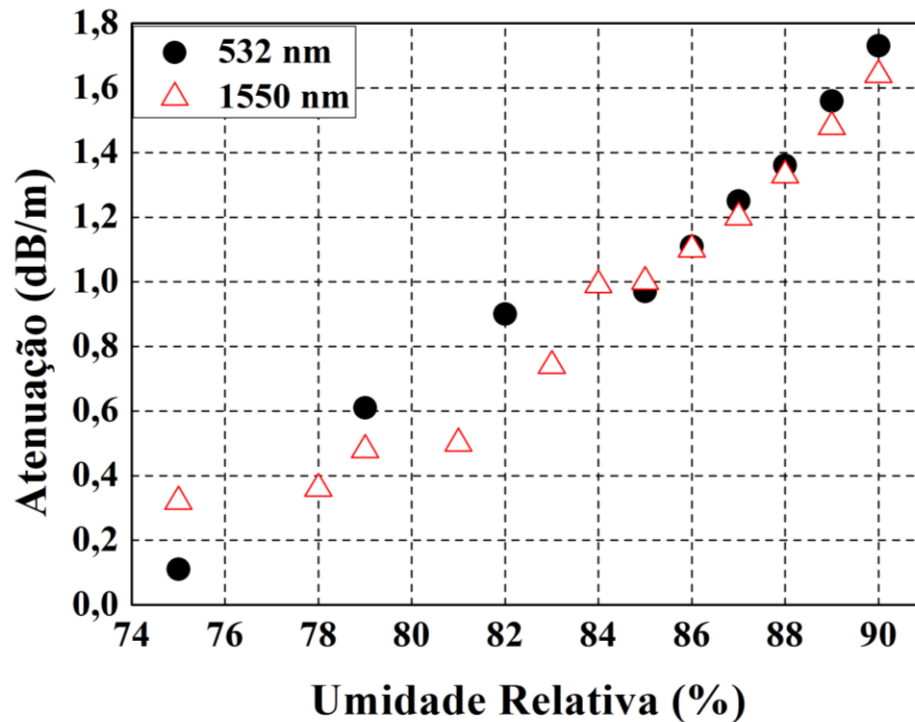
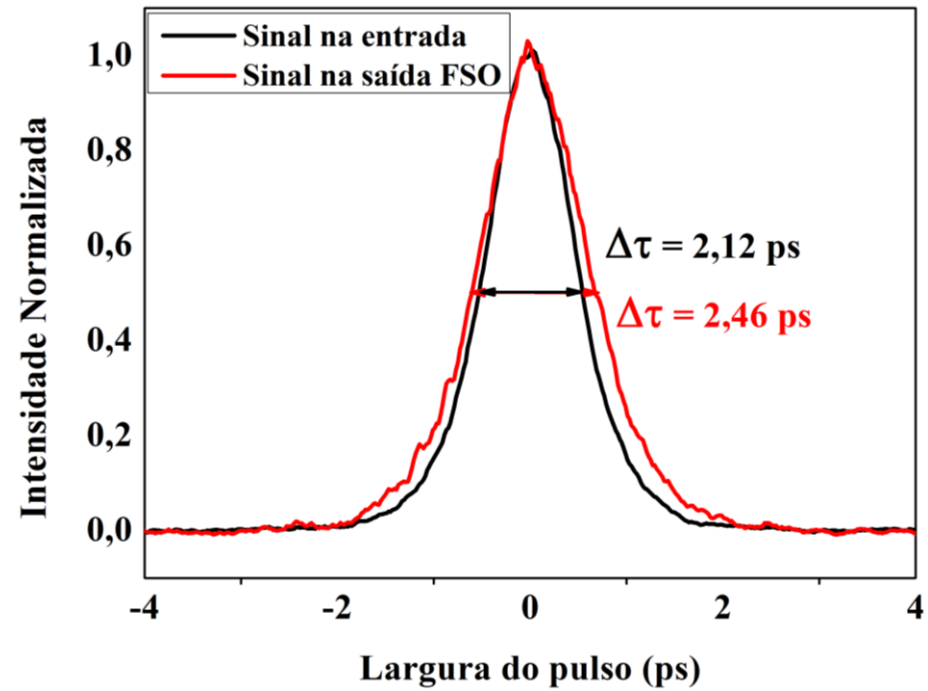


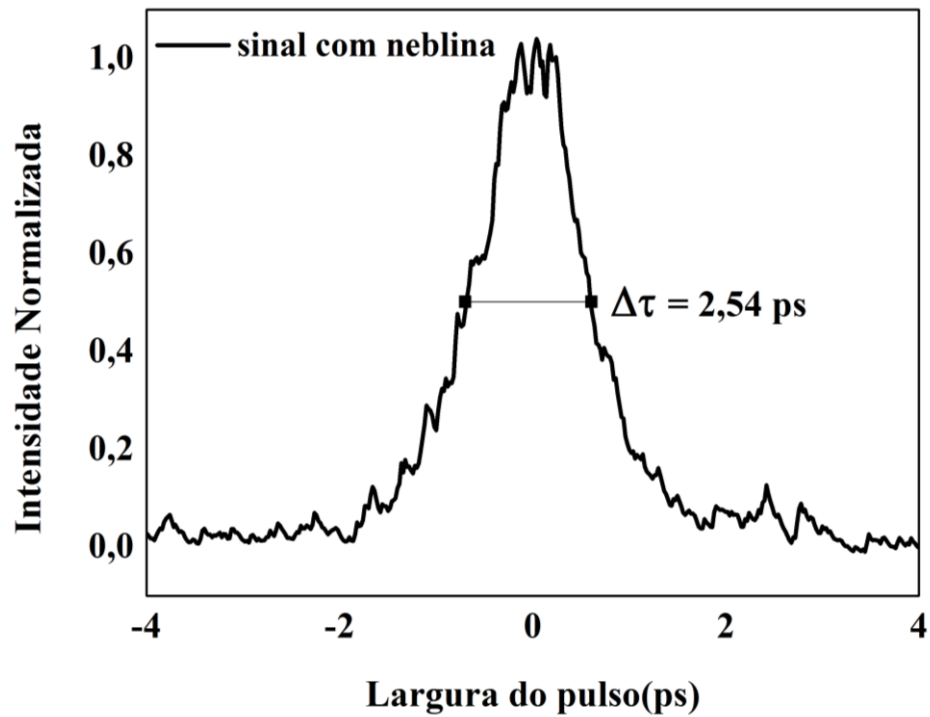
Fig. 5.4. Relação entre a atenuação em 532nm e 1550nm e a umidade relativa sob condições de neblina

**(b) Efeitos da neblina na duração de pulsos ultracurtos.** Para a transmissão de pulsos ultracurtos, com durações na ordem de picossegundos, foi utilizado um laser a fibra dopada com érbio, no regime de modo-bloqueio, no comprimento de onda de 1550nm [64]. O objetivo foi observar a influência da neblina na dispersão temporal do pulso. Os ensaios foram feitos com a propagação no canal sem neblina e, depois, com a neblina em 90% de umidade relativa. A potência óptica média transmitida pelo laser foi de 1mW e com a frequência de repetição dos pulsos de 12 MHz. A Figura 5.5(a) ilustra a combinação dos pulsos na entrada e na saída do sistema FSO sem neblina. O resultado mostra um pulso na saída levemente distorcido, comparado com o sinal de entrada, por causa do espalhamento do feixe óptico. Quando foi analisado no canal com neblina (Fig. 5.5(b)), observou-se o impacto na sua dispersão. A largura do pulso variou 0,42ps no enlace com extensão de 1,60 metro. Isto significa que para distâncias maiores o alargamento será maior, o que limita a taxa de transmissão do sinal. A envoltória desse pulso também foi distorcida com a neblina. A justificativa é o fato de a neblina reduzir a po-

tência com o aumento da atenuação e ocorre inserção de ruído com picos elevados no sinal, durante a transmissão.



(a)

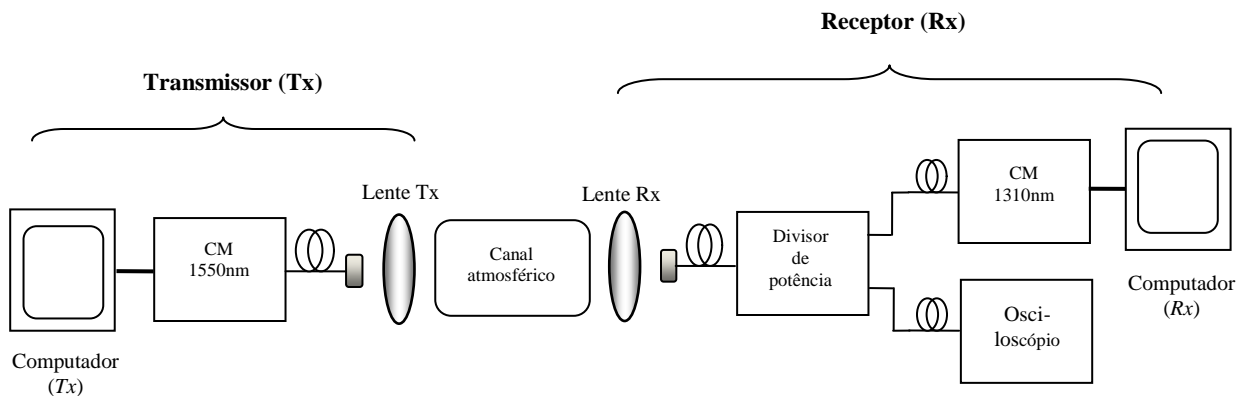


(b)

Fig. 5.5. (a) Duração do pulso na entrada e saída do enlace FSO sem neblina. (b) Duração do pulso com neblina.



(c) **Análise do diagrama de olho no sistema.** O digrama de olho permite avaliar o desempenho de um sistema de transmissão digital, mostrando degradações no sinal processado. Indica os efeitos de interferência intersimbólica e os acréscimos de ruído no sistema. É obtido superpondo várias amostras de um sinal colhidas no domínio do tempo, de modo que os sucessivos símbolos fiquem sobrepostos. As amostras recebidas devem ser sincronizadas com o sinal transmitido. Para a geração do diagrama, empregaram-se os dois conversores de mídia nos comprimentos de onda 1550nm e 1310nm, cada um ligado a um computador. Na recepção, foi utilizado um divisor de potência ligado ao conversor de mídia e ao osciloscópio. Uma parte da potência do divisor era enviada ao conversor e a outra ao osciloscópio para a visualização do sinal, como observado na Figura 5.6.



**Fig. 5.6.** Diagrama em blocos da montagem empregada para a geração do diagrama de olho.

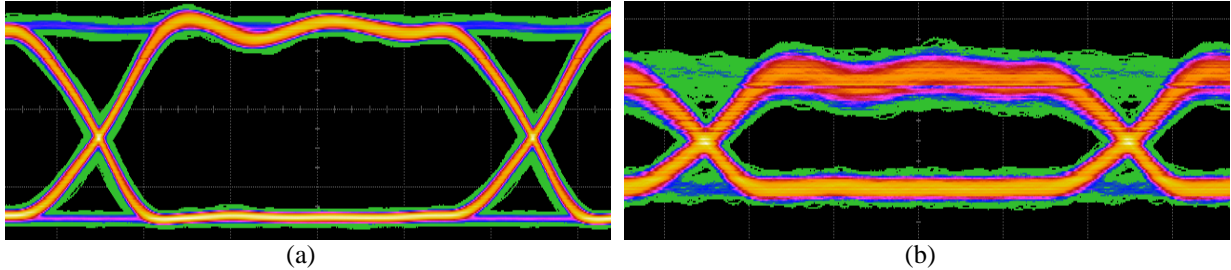
A geração do diagrama de olho foi feita nos conversores de mídia. O conversor na transmissão enviava a informação recebida pelo computador ligado a ele para a recepção e vice-versa. A troca dessa informação gerava um sinal modulado aleatoriamente e a sobreposição deste sinal formava o diagrama. A Figura 5.7 (a) ilustra o resultado na saída do enlace no canal sem neblina e em (b) o diagrama com neblina, sob 90% de umidade relativa.

Na Figura 5.7 (a) o olho está completamente aberto, resultado da propagação em um canal sem neblina. O diagrama da Figura 5.7(b) sofreu distorção e reduziu sua amplitude com a neblina. A taxa de erro de bit é determinada pelo fator- $Q$ , definido como a qualidade do olho, segundo a Equação (5.1) [21]. O seu valor era fornecido diretamente pelo osciloscópio no momento da medição do diagrama de olho.



$$BER = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q \sqrt{2\pi}} \quad (5.1)$$

Para 90% de umidade relativa, o valor de  $Q$  foi de 4,55 levando a uma BER de  $1,58 \times 10^{-6}$ . Esta avaliação mostra que o sistema é viável para a transmissão, considerando o limite do código de correção de erro, FEC de  $3,8 \times 10^{-3}$  [62][65].



**Fig. 5.7.** (a) Diagrama de olho na saída do sistema sem neblina. (b) Diagrama com neblina, em condição de 90% de umidade relativa.

## 5.4 Comentários sobre o capítulo

Analisaram os efeitos da neblina no protótipo de um enlace óptico no espaço aberto com extensão de 1,60 metro. Para os ensaios, utilizaram-se dois comprimentos de onda, um na faixa visível de 532nm e outro no infravermelho próximo, na janela usual dos sistemas de comunicações ópticas de 1550nm. Como descrito na teoria, demonstrou-se no experimento que a atenuação numa escala logarítmica em decibels cresce linearmente com o aumento da umidade relativa do meio. O comprimento de onda de 1550nm apresentou um desempenho ligeiramente melhor no enlace com o canal sob a influencia da neblina. A duração de pulsos ultracurtos, na ordem de picossegundos, também foi analisada no enlace sem neblina e com neblina em 90% de umidade relativa. O objetivo foi verificar o que acontece com a dispersão temporal do pulso. Constatou-se que a neblina influenciou na sua duração, variando 0,42 ps no enlace de 1,60 metro de comprimento. Isto significa que para maior distância maior será o alargamento do pulso, o que limita a taxa de transmissão do sinal. O desempenho do enlace foi analisado com o auxílio do diagrama de olho. Observou-se que para um canal com a influência da neblina em 90% de umidade o valor da BER foi de  $1,58 \times 10^{-6}$ , mostrando que o sinal é viável para a transmissão de dados, considerando o limite do FEC.

## Capítulo 6

### Comentários e conclusões

#### 6.1. Comentários gerais

Fez-se um estudo sobre o sistema de comunicações ópticas no espaço aberto, detalharam-se as vantagens e as desvantagens que esse sistema apresenta em relação às tecnologias existentes e a sua aplicação para suprimir a demanda por largura de faixas cada vez maiores. No Capítulo 2 foram descritos os princípios de funcionamento desse sistema os principais componentes utilizados, como os tipos de diodo lasers e de fotodetectores mais comuns, suas aplicações vantagens e desvantagens. Fez-se, ainda, uma breve comparação sobre as características dos fotodetectores. Conclui-se que os fotodiodos *APDs* são mais aplicados em um sistema óptico no espaço aberto, pois o ganho interno que apresentam possibilita a construção de receptores mais sensíveis do que os fabricados com fotodiodos do tipo *p-i-n*.

As equações de onda foram descritas no Capítulo 3, descrevendo a propagação das ondas eletromagnéticas em diferentes meios. Apresentou-se a propagação do feixe óptico na atmosfera, destacando-se que mesmo um feixe colimado perfeitamente sofre efeitos de espalhamentos, absorções e difrações nas componentes do meio, com pequenas divergências na trajetória original. Foram abordadas as lentes empregadas nesse tipo de sistema, utilizadas para colimar e focalizar o feixe. Essa parte serviu de base importante na escolha das lentes objetivas de 10x na Newport, empregadas na colimação e na focalização do feixe óptico na parte experimental.

No Capítulo 4, foram discutidas as causas da degradação do feixe óptico no espaço aberto, destacando-se os efeitos da absorção atmosférica, do espalhamento e da turbulência. Mostrou-se que a neblina é a condição atmosférica que mais degrada o feixe óptico por ser composta de gotículas de água muito finas, com dimensões inferiores a um décimo de milímetro. Foram

abordados os tipos de neblina e fez-se um levantamento das atenuações por efeito da cintilação e pelo deslocamento do feixe na turbulência atmosférica. Para esta análise, utilizou-se o programa MATLAB<sup>®</sup> nos comprimentos de onda, 785nm, 850nm e 1550nm. Observou-se que em 1550nm houve melhor desempenho em relação aos outros valores ensaiados.

Foi descrito um protótipo de enlace óptico no espaço aberto no Capítulo 5, com extensão de 1,60m e analisou-se o impacto da neblina. Mostrou-se como a atenuação cresce para diferentes graus de umidade relativa em comprimentos de onda de 1550nm e 532nm para a portadora óptica. O comprimento de onda de 1550nm apresentou melhor desempenho na maioria dos pontos de medição. Analisou-se a duração de pulsos ultracurtos gerados por um EDFL, verificando-se sua alteração com a presença da neblina. Além da dispersão temporal, sua envoltória ficou distorcida com elevados picos de ruídos no ambiente com neblina em 90% de umidade relativa. O diagrama de olho também foi influenciado pela neblina, ficando totalmente aberto quando submetido no canal sem neblina e distorcido no canal com neblina em 90% de umidade. Com o diagrama de olho, estimou-se a BER através do fator que mede a qualidade do olho ( $Q$ ). Na neblina com 90% da umidade a BER foi de  $1,58 \times 10^{-6}$  mostrando que é possível a transmissão, porém respeitando o limite do código de correção de erro (FEC).

## 6.2 Conclusões

O trabalho apresentou um enlace óptico no espaço aberto, com montagem de um protótipo em laboratório e equipamentos que permitissem resultados confiáveis nas medições. O objetivo do trabalho foi analisar a influência da neblina nesse tipo sistema de comunicações. Foram utilizados dois comprimentos de onda, um na faixa visível e outro no infravermelho próximo. Para avaliação dos efeitos da neblina utilizou-se um aparelho termo-higrômetro que mede a umidade relativa do meio. Esse aparelho foi ajustado para permitir controle de umidade entre 70% e um máximo de 90%.

Demonstrou-se que a atenuação cresce com o aumento da umidade relativa e o comprimento de onda de 1550nm apresentou melhor desempenho que portadoras na faixa de luz visível (532nm). Foi importante comprovar que 1550nm é mais indicado para sistemas ópticos no espaço aberto, por ser compatível com modernos enlaces empregando fibras ópticas de baixa atenuação. A neblina teve impacto na dispersão temporal de um pulso de curta duração (na

ordem de picossegundos) e sua envoltória foi alterada com picos de ruído elevados, pois a atenuação diminuiu a potência óptica e, conseqüentemente, as influências dos ruídos apareceram de forma mais evidente. O desempenho do sistema foi avaliado com auxílio do diagrama de olho para o canal sem neblina e com neblina. Os resultados mostraram claramente a influencia da neblina no sistema óptico no espaço aberto, mas com resultados satisfatórios para enlaces de curtas distâncias.

### **6.3 Sugestões para trabalhos futuros**

Analisou-se a dispersão temporal de pulsos ultracurtos na ordem de picossegundos e mostrou-se que a neblina influenciou de maneira gradativa na duração do pulso. Em um trabalho futuro, seria conveniente uma análise da dispersão de pulsos ultracurtos, na ordem de femtossegundos, no enlace FSO. Deve-se prever um canal modelado com a influência da neblina e de outros efeitos que afetassem sua duração. Propõe-se, também, um estudo de campo sobre os efeitos da chuva nos sistemas ópticos em ambientes abertos para maiores distâncias, um estudo da ampliação na capacidade do sistema com emprego da tecnologia WDM. É importante, ainda, estudar a tecnologia FSO no atendimento de demandas de internet das coisas (IoT) e para os recursos previstos em sistemas de comunicações de quinta geração (5G).

## **Anexo A**

### **Trabalhos publicados referentes à dissertação**

- ALMEIDA, I. M. A; AIUB, E. J; SAITO, L. A. M.; RIBEIRO, J. A. J. *Effects of Fog in Free-Space Optics Communication System*, Frontiers in Optics/Laser Science Conference- FiO/LS, Washington D.C, Set. 2017.

## Referências Bibliográficas

- [1] DETTMER, R. A ray of light, free space optical transmission. *IEE Review*, v. 47, p.32-33, 2001.
- [2] KILLINGER, D. Free space optics for laser communication through the air. *Optics and Photonics News*, v. 13, p. 36-42, 2002.
- [3] ASSIS, N. C. N. *Sistema para Medição da Constante de Estrutura de Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude*. Tese de mestrado, Universidade Federal Fluminense, Jul. de 2012.
- [4] GOODWIN, F. E. A review of operational laser communication systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 58, n. 10, p. 1746-1752, 2002.
- [5] KUBE, E. Information transmission by light through the atmosphere. *Nachrichtentechnik Journal*, Berlim, v. 6, p. 201-207, 1968.
- [6] FLETCHER, G.; HICKS, T.; LAURENT, B. The SILEX optical interorbit link experiment. *Electronics & communication engineering journal*, v. 3 p. 273-279, 1991.
- [7] TOYOSHIMA, M. et al. Ground-to-satellite laser communication experiments. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, v. 23, p. 10-18, 2008.
- [8] OSORIO, J. A. H. *Simulação e desenvolvimento de um enlace de free-space optics no Rio de Janeiro e a relação com a ITU-T G826*. Tese de mestrado, Universidade Católica, Jul. de 2005.
- [9] JUNIOR, J. F. M. A. *Modelagem Experimental de um Link FSO com Inserção de Feixe não Difrativos*. Tese de mestrado, Universidade Federal de Campinas, Jan. de 2013.
- [10] WILLEBRAND, H.; GHUMA, S. B. *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Indiana: Sams, 2002.
- [11] GHASSEMLOOY, Z. et al. *Optical Wireless Communications, System and Channel Modelling with Matlab*. CRC, p. 35-74. 2013.
- [12] MAHDY, A.; DEOGUN. *Wireless optical communication: a survey*. Wireless Communications and Networking Conference. WCNC, IEEE, v. 4 p. 2399-2404, 2004.
- [13] IJAZ, M. *Experimental Characterisation and Modelling of Atmospheric Fog and Turbulence in FSO*. University of Northungria, Ph.D, May 2013.
- [14] DODLEY, J. P. et al. *Free Space Optical Technology and Distribution Architecture for Broadband Metro and Local Services*. Optical communications III, Proceedings of SPIE. V. 4214, p. 72-85, 2001.

- [15] BOUCHET, O. et al. *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. ISTE USA, 2006.
- [16] KIM, I. I.; MCARTHUR, B.; KOREVAAR, E. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *Proc. SPIE*, n. 4214, p. 26-37, 2001.
- [17] KOLKA, A. et al. Model of Atmospheric Optical Channel with Scattering. *Latest Trends on Communications*, p. 141-144.
- [18] ALI, M. A. A. Atmospheric Turbulence Effect on Free Space Optical Communications. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, p. 345-351, 2013.
- [19] SILVA, V. N. H. *Desenvolvimento Experimental de Uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre*. Universidade Federal Fluminense. Tese de mestrado. Jul. de 2009.
- [20] COLVERO, C. P. *Análise experimental de sistemas de comunicações ópticas no espaço livre em diferentes comprimentos de onda*. Tese de doutorado. Universidade Católica, Rio de Janeiro, Ago. de 2005.
- [21] AGRAWAL, G. P. *Sistema de comunicação por fibra óptica*. 4ª. Ed. Elsevier, 2014.
- [22] ZULIYANA, M. et al. Performance Analysis of FSO with Haze Attenuation Consequence Acclimatize in Tropical Rainforest Environment. *ARNP J. of Engineering and Applied Sci.* v.10, n.3, p.1332-1337, 2015.
- [23] KEISER, G. *Comunicações por fibra óptica*. 4ª. Ed. Ltda, McGraw-Hill, 2014.
- [24] GOUVEIA, F. *Projeto de um transceptor óptico para comunicação digital em espaço livre*. Universidade de São Paulo (USP). Tese de mestrado, Mar. de 2007.
- [25] FARIA, V. G. M. *Metodologia de projetos para enlaces ópticos no espaço livre*. Universidade Federal da Paraíba. Tese de mestrado, Jul. de 2014.
- [26] SIGNORET, P. et al. 3.6MHz linewidth 1.55mm monomode vertical-cavity surface-emitting laser. *IEEE Photonics Technology Let*, v. 13, n. 4, p. 269-271, 2001.
- [27] McINTYRE, R. J. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiode theory, *IEEE Trans. Electron Devices*, v. 19, n. 6, p. 703-713, 1972.
- [28] PERSONICK, S. D. *Receiver design for digital fiber optic communication systems*. Bell System Tech. J., v. 52, n. 6, p. 843-886, 1973.
- [29] KIM, I. I. et al. Measurement of scintillation and link margin for the TerraLink laser communication system. *Proceedings of SPIE*, v. 3232, 1998, p. 100-118.
- [30] ROCKWELL, D. A.; MECHERLE, G. S. Wavelength Selection for Optical Wireless Communication Systems. *Proceedings of SPIE*, v. 4530. p. 27-35.
- [31] MAXWELL, J.C. *A treatise of electricity and magnetism*. 3ª. Ed. New York: Dover, 1954.

- [32] MENESES, P. et al. *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Universidade de Brasília: CNPq, v. 1, p. 1-256, 2012.
- [33] KAUSHAL, H. et al. Free Space Optical Communication: Challenge and Mitigation Techniques. *IEEE Communications Survey & Tutorial*, v.19, p. 57-96, 2017.
- [34] SINGAL, P. et al. Comparison of Different Transmitters Using 1550nm and 10000nm in FSO Communication Systems. *International J. of Computer Sci. & Information Technology (IJCSIT)*, v. 7, n. 3, 2015.
- [35] BLOOM, S. et al. Understanding the performance of free-space optics. *J. Optical Network.*, v. 2, n. 6, p. 178-200, 2003.
- [36] KARATAY, O. *An Alternative Approach too Free Space Optical Communication Link*. Dissertation Thesis. Izmir Institute of Technology, Jul. 2004.
- [37] SELF, S. A. *Focusing of spherical Gaussian beams*. Applied optics, v. 22, n. 5, p. 658-661, 1983.
- [38] ESTRADA, D. M. E. *Propagação de feixes ópticos em meios não lineares*. Tese de mestrado. Universidade técnica de Lisboa, Jun. de 2008.
- [39] HUGO, W. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. Bellingham, WA: SPIE Opt. Eng. Press, 1990.
- [40] COURA, D. J. C. *Análise dos principais efeitos da propagação de sinais ópticos, no espaço livre, revestida de uma plataforma numérica eficiente*. Tese de mestrado. Instituto Nacional de Telecomunicações, Maio. de 2004.
- [41] NETTO, M. N. C. G. *Óptica geométrica em uma perspectiva matemática*. Universidade Federal de Goiás. Tese de mestrado, Nov. de 2015.
- [42] JACOBSEN, A. et al. *Absorption and scattering losses in glasses and fiber light guidance*. *J. American Ceramic Soc.*, v. 54, n. 4, p. 186-187, Apr., 1971
- [43] KRAUS, J. D. *Electromagnetics*. 4th. Ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [44] RIBEIRO, J. A. J. *Comunicações ópticas*. São Paulo: Érica, 2003.
- [45] KIM, I. I. Wireless optical transmission of Fast Ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication system. *Opt. Eng. SPIE*, v. 37, n. 12, p. 3143-3155, 1998.
- [46] CORDEIRO, M. C. R. *Avaliação experimental dos efeitos de cintilação no canal óptico no espaço livre em 780 nm, 1500 nm e 9100 nm*. Universidade Católica. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, Março de 2008.
- [47] MAJUMDAR, A. K.; RICKLIN, J. R. *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*. Springer 2008.
- [48] AWAN, M. S. et al. Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation. *Journal of communications*, v. 4, p. 533-545, 2009.
- [49] World Meteorological Organization. *Manual on Codes: International Codes*. Vol. II. Geneve: World Meteorological Organization, 2009.



- [50] SOUZA, M. P. *Previsão de duração de nevoeiro no aeroporto internacional de são paulo utilizando análise de sobrevivência*. Tese de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, abril de 2008.
- [51] ROCHA, A. C. et al. B. *Estudo sobre ocorrências de nevoeiro no aeroporto internacional do rio de janeiro/galeão – Antônio Carlos Jobim*. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br>. Acesso em: 23 ago. 2016.
- [52] World Meteorological Organization. *Manual on Codes: International Codes*. Vol. II. Geneve: World Meteorological Organization, 2009.
- [53] NABULSI, M. A. et al. Measured and predicted light attenuation in dense coastal upslope Fog at 650, 850 and 950 nm for free space optics applications. *J. Optic. Eng.* v. 47, p. 1-14, 2008.
- [54] NABULSI, M. A.; SIZUN, H.; FORNE, F. D. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. *Optic. Eng.* v. 43, n. 2, p. 319-329, 2004.
- [55] AWAN, M. S.; NEBULONI, R.; CAPSONI, C.; CSURGAI-HORVÁTH, L.; MUHAMMAD, S. S.; LEITGEB, E.; NADEEM, F.; KHAN, M. S. "Prediction of drop size distribution parameters for optical wireless communications through moderate continental fog," *Int J. Sat. Commun. Net.*, v. 28, n. 2, p. 97- 116, Feb., 2010.
- [56] PETTY, G. W.; HUANG, W. The modified gamma size distribution applied to inhomogeneous and nonspherical particles: key relationships and conversions. *J. Atm. Sci.*, v. 68, n. 7, p. 1460-1473, Jul., 2011.
- [57] CARBONNEAU, T. H., WISELY, D. R. *Opportunities and Challenges for Optical Wireless: the Competitive Advantage of Free Space Telecommunications Links in Today's Crowded Market Place*. SPIE Conference on optical wireless communications, Boston, Massachusetts, v. 3232, 1998.
- [58] BOUCOUVALAS, A. C. Indoor ambient light noise and its effect on wireless optical links. *IEEE Proc. Optoelectronics*, v. 143, n. 6, p. 334-338, 1996.
- [59] ABBABE, A. L. R. *Limites impostos pela dispersão por modo de polarização em sistemas ópticos de elevada taxa de transmissão*. Tese de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, agosto de 2008.
- [60] BONCRISTIANO, E. S. *Geração de pulsos ultra-curtos a altas taxas em laser a fibra dopada com érbio*. Tese de mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie. 2006.
- [61] IJAZ, M. et al. Smoke attenuation in Free Space Optical Communication under Laboratory Controlled Conditions. *International symposium on telecommunications, IST*, p. 758-752, 2014.
- [62] LEE, I. E, et al. Near-Infrared Wireless Optical Communication with Particulates In-Suspension over the Underwater Channel, *STh30.4 CLEO*, 2017.
- [63] ESMAIL, M. A.; FATALLAH, H.; ALOUINI, M. S. An Experimental Study of FSO Link Performance in Desert Environment. *IEEE Communications Letters* v. 20, p. 1888-1891, 2016.

- [64] AIUB, E. J, et al. 200-fs mode-locked Erbium-doped fiber laser by using mechanically exfoliated MoS<sub>2</sub> saturable absorber onto D-shaped fiber. *Opt. Express*, v. 25, p. 10546-10552, 2017.
- [65] NAKAMURA, K. et al. Optical Wireless Transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel. *Opt. Express*, v. 23, n. 2, p. 1558-1566, 2015.