

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOÃO GABRIEL PORTO SILVARES CORRÊA

ESTUDO DOS EFEITOS DA TURBULÊNCIA EM UM ENLACE FSO

Rio de Janeiro

2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

JOÃO GABRIEL PORTO SILVARES CORRÊA

ESTUDO DOS EFEITOS DA TURBULÊNCIA EM UM ENLACE FSO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica no Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi, D.C.

Co-orientador: Cap. Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro, D.C.

Rio de Janeiro

2016

c2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

JOÃO GABRIEL PORTO SILVARES CORRÊA

ESTUDO DOS EFEITOS DA TURBULÊNCIA EM UM ENLACE FSO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em engenharia elétrica.

Orientadora: Prof^a. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi - D.C.

Co-orientador: Cap. Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro - D.C.

Aprovada em 06 de junho de 2016 pela seguinte banca examinadora:

Prof^a. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi - D.C. do IME – Presidente

Cap. Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro - D.C. do IME.

Prof. Andrés Pablo López Barbero - D.C. da UFF.

Prof^a. Maria Aparecida Gonçalves Martinez - Ph.D. do CEFET/RJ.

Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes - Ph.D. do IME.

Rio de Janeiro
2016

Dedico este trabalho ao meu avô Itamar Porto, por ter me aconselhado com sabedoria ao longo dos anos e por ter me mostrado que é preciso ter dedicação e força de vontade para superar os desafios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, minha irmã e meus avós, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis. Sem o apoio deles, o sucesso deste trabalho não seria possível.

À professora Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi, por ter me orientado da melhor forma possível, sendo sempre muito solícita e me ajudando a caminhar corretamente no decorrer da elaboração deste trabalho.

Ao capitão Andrezo, meu coorientador que me auxiliou com conselhos de grande valia para a realização das simulações presentes neste trabalho.

Em especial, a Daniel Raposo, Clarice Porto, Alessandra Aleixo, Cairo Caplan e Marcos Aurélio Filho, por terem me auxiliado na elaboração e manipulação de figuras e gráficos, além de terem me ajudado a contornar problemas técnicos. A amizade de vocês é essencial.

Ao Rafael Bessoni, cuja pesquisa elaborada foi essencial para o desenvolvimento do estudo aqui apresentado.

Ao Alberto e demais professores e funcionários do IME que me auxiliaram direta e indiretamente.

Ao Exército Brasileiro, por ter dado suporte à minha pesquisa e por permitir que me tornasse Mestre em Engenharia Elétrica com orgulho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SIGLAS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos da Dissertação	22
1.2 Motivação	22
1.3 Organização da Dissertação.....	23
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
2.1 Elementos Básicos do Sistema	24
2.2 Intensidade Óptica	25
2.2.1 Intensidade Óptica Com Distribuição Gaussiana	25
2.2.2 Distribuição Uniforme	27
2.3 Fenômenos no Espaço Livre.....	28
2.3.1 Atenuação Atmosférica	28
2.3.1.1 Absorção	30
2.3.1.2 Espalhamento.....	31
2.3.2 Atenuação Geométrica.....	33
2.3.2.1 Desalinhamento Entre Transmissor e Receptor.....	36
2.3.2.1.1 Desalinhamento Lateral Entre o Transmissor e o Receptor em um Eixo Considerando um Feixe Gaussiano	37
2.3.2.1.2 Deslocamento Angular do Transmissor Considerando um Feixe Gaussiano.....	38
2.3.2.1.3 Deslocamento Angular do Receptor Considerando um Feixe Gaussiano	39
2.3.2.1.4 Atenuação Geométrica Devido ao Desalinhamento Entre Transmissor e Receptor Usando-se Feixe Cônico	39
2.3.3 Turbulência Atmosférica	45
2.3.3.1 Vagueamento do Feixe	49
2.3.3.2 Espalhamento do Feixe.....	50
2.3.3.3 Cintilação.....	52
2.3.3.4 Alargamento Temporal do Pulso Devido à Turbulência	54
2.3.4 Atenuação Total do Feixe em um Enlace FSO.....	54

3.	MODELAGEM DO ENLACE FSO	56
3.1	Componente Para Simulação do meio de Propagação	56
3.2	Sistemas Analisados	58
3.2.1	Sistema Básico.....	58
3.2.2	Sistema OCDMA 1D.....	61
3.2.2.1	Gerador de Pulsos Ópticos.....	64
3.2.2.2	Codificadores e Decodificadores OCDMA	66
3.2.2.3	Hard Limiter	66
3.2.2.4	Elementos dos Receptores	68
4.	RESULTADOS OBTIDOS.....	69
4.1	Resultados Para o Sistema Básico	69
4.2	Resultados Para o Sistema OCDMA 1D	92
4.3	Alargamento Temporal Do Pulso	107
4.3.1	Alargamento De Acordo Com A Largura Inicial	108
4.3.2	Alargamento De Acordo Com A Distância	110
5.	CONCLUSÃO, TRABALHOS FUTUROS E ARTIGOS	111
5.1	Trabalhos Aceito e Submetido.....	115
5.1.1	Artigo Aceito Sobre Modelagem do FSO em um Sistema Simples.....	115
5.1.2	Artigo Submetido Sobre Modelagem do FSO em um Sistema OCDMA 1D	115
6.	REFERÊNCIAS.....	116
7.	APÊNDICES	120
7.1	Códigos Utilizados Para o Cálculo da Interseção Entre Áreas de Elipses	121
7.1.1	Código Para Identificar os Pontos das Elipses que se Interceptam	121
7.1.2	Código Para o Caso Com 0 ou 1 Ponto de Interseção Entre as Elipses.....	123
7.1.3	Código Para o Caso Com 2 Pontos de Interseção Entre as Elipses	123
7.1.4	Código Para o Caso Com 3 Pontos de Interseção Entre as Elipses	125
7.1.5	Código Para o Caso Com 4 Pontos de Interseção Entre as Elipses	126

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1 Erhard Kube utilizando um lightphone nos anos 60.....	18
FIG. 1.2 FSO aplicado em uma rede (TJONDRONEGORO, 2005).	19
FIG. 2.1 Elementos principais de um enlace FSO (RODRIGUES, 2012).....	24
FIG. 2.2 Perfil de irradiância de um pulso Gaussiano (CVI MELLES GRIOT, 2009).	26
FIG. 2.3 Campo de irradiância antes (a) e depois da propagação (b) de um feixe com distribuição de irradiância uniforme (RODRIGUES, 2012).....	28
FIG. 2.4 Janelas de transmitâncias atmosféricas (COLVERO, 2005).	30
FIG. 2.5 Diagramas de espalhamento: (a) Rayleigh, (b) Mie e (c) Não-seletivo (COELHO, 2008).....	31
FIG. 2.6 (a) Feixe convergente, (b) feixe colimado, e (c) feixe divergente (ANDREWS, 2005).....	34
FIG. 2.7 Formação do cone de divergência devido à difração (DOS SANTOS, 2008).....	34
FIG. 2.8 Relação entre os parâmetros do feixe, do transmissor e do receptor (DOS SANTOS, 2008).....	35
FIG. 2.9 Exemplos de desalinhamento na geometria entre o feixe (área cinza) e o receptor (área branca) (RODRIGUES, 2012).	37
FIG. 2.10 Dimensões da elipse após o rotacionamento.	42
FIG. 2.11 Distância auxiliar x_1 após o rotacionamento.....	43
FIG. 2.12 Efeitos da turbulência no enlace FSO (BOUCHET, 2006).	45
FIG. 2.13 Medidas experimentais de C_n^2 ao longo de um dia no Rio de Janeiro (OSORIO, 2005).....	46
FIG. 2.14 Cascata de energia de Kolmogorov para turbulência atmosférica (ANDREWS, 2004).....	47
FIG. 2.15 Relação trigonométrica entre o espalhamento e o vagueamento do feixe causados pela turbulência atmosférica (ANDREWS, 2004).	52
FIG. 2.16 Efeito da miragem devido à cintilação.	53
FIG. 3.1 Diagrama esquemático do sistema básico (RODRIGUES, 2012).....	59
FIG. 3.2 Sistema básico de FSO implementado no programa OptiSystem.	60
FIG. 3.3 Comparação entre as técnicas de multiplexação TDMA, FDMA e CDMA (TARHUNI, 2007).	61

FIG. 3.4 Diagrama esquemático simplificado do enlace FSO com sistema OCDMA 1D (RODRIGUES, 2012).	62
FIG. 3.5 Arquitetura básica adotada para o sistema OCDMA 1D (CARNEIRO, 2013).....	63
FIG. 3.6 Modulador óptico de LiNbO ₃ (AGRAWAL, 2002).	65
FIG. 3.7 (a) Potência de sequência de bits sem o uso do hard-limiter. (b) Ação do hard-limiter na potência de uma sequência de bits.....	67
FIG. 4.1 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência.	70
FIG. 4.2 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência. 71	
FIG. 4.3 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento.	72
FIG. 4.4 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento.	73
FIG. 4.5 Variação de BER em relação ao comprimento do enlace para diferentes níveis de desalinhamento.....	74
FIG. 4.6 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y	75
FIG. 4.7 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y	76
FIG. 4.8 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute.....	77
FIG. 4.9 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute.....	78
FIG. 4.10 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y	78
FIG. 4.11 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y	79
FIG. 4.12 Atenuação causada pela cintilação em relação ao comprimento do enlace.....	80
FIG. 4.13 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio turbulento.	80
FIG. 4.14 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio turbulento.....	81
FIG. 4.15 Potência recebida em função da variância de Rytov.	82
FIG. 4.16 Potência recebida de acordo com a potência transmitida em meio turbulento.....	83

FIG. 4.17 Potência recebida em função do comprimento do enlace em meio turbulento e com desalinhamento.....	84
FIG. 4.18 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio turbulento e com deslocamento.....	84
FIG. 4.19 Potência recebida em função do deslocamento axial no receptor.	85
FIG. 4.20 Potência recebida em função do comprimento do enlace em meio turbulento e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y	86
FIG. 4.21 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y	86
FIG. 4.22 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação.....	87
FIG. 4.23 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação.	88
FIG. 4.24 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y	88
FIG. 4.25 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y	89
FIG. 4.26 Diagramas de olhos obtidos na ausência de um desalinhamento no enlace com: (a) $\sigma_R^2 = 0,05$, (b) $\sigma_R^2 = 0,5$ e (c) $\sigma_R^2 = 1,5$	90
FIG. 4.27 Diagramas de olhos obtidos em um enlace com desalinhamento no transmissor e com: (a) $\sigma_R^2 = 0,05$, (b) $\sigma_R^2 = 0,5$ e (c) $\sigma_R^2 = 1,5$	91
FIG. 4.28 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência – caso OCDMA.....	92
FIG. 4.29 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência – caso OCDMA.....	93
FIG. 4.30 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento – caso OCDMA.	94
FIG. 4.31 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento – caso OCDMA.....	95
FIG. 4.32 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.	96
FIG. 4.33 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.....	96

FIG. 4.34	Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação – caso OCDMA.....	97
FIG. 4.35	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação – caso OCDMA.	98
FIG. 4.36	Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y – caso OCDMA.	98
FIG. 4.37	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y – caso OCDMA. ...	99
FIG. 4.38	Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio turbulento - OCDMA.	100
FIG. 4.39	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio turbulento – OCDMA.....	100
FIG. 4.40	Potência recebida em função do comprimento do enlace em meio turbulento e com desalinhamento – caso OCDMA.....	101
FIG. 4.41	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento – caso OCDMA.....	102
FIG. 4.42	Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.	103
FIG. 4.43	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.....	104
FIG. 4.44	Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute – caso OCDMA.....	105
FIG. 4.45	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute – caso OCDMA.....	105
FIG. 4.46	Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y – caso OCDMA.....	106
FIG. 4.47	BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y – caso OCDMA....	107
FIG. 4.48	Alargamento do pulso em função da largura inicial do pulso.	108
FIG. 4.49	Alargamento do pulso em função da largura inicial do pulso em um enlace aéreo entre UAVs.....	109

FIG. 4.50 Alargamento do pulso pela distância do enlace..... 110

LISTA DE TABELAS

TAB. 3.1 Parâmetros para a modelagem do canal FSO.....	57
TAB. 3.2 Parâmetros de simulação do sistema OCDMA 1D.	64

LISTA DE SIGLAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
BER	Taxa de Erros de Bits (<i>Bit Error Rate</i>)
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código (<i>Code Division Multiple Access</i>)
CW	Onda Contínua (<i>Continuous Wave</i>)
DS	Sequência Direta (<i>Direct Sequence</i>)
FDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (<i>Frequency Division Multiple Access</i>)
FSO	Óptica no Espaço Livre (<i>Free Space Optics</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light-Emitting Diode</i>)
MAN	Rede Metropolitana (<i>Metropolitan Area Network</i>)
MZ	Mach-Zehnder
NRZ	Não Retorna a Zero (<i>non-return-to-zero</i>)
OCDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código Óptico (<i>Optical Code Division Multiple Access</i>)
PC	Código Primo (<i>Prime Code</i>)
RF	Radiofrequência
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
UAV	Veículos Aéreos Não Tripulados (<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>)
WAN	Rede de Longa Distância (<i>Wide Area Network</i>)
WDM	Multiplexação por Divisão de comprimento de onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)
WH/TS	Salto de Comprimento de Onda e Espalhamento Temporal (<i>Wavelength-Hopping/Time-Spreading</i>)

RESUMO

Neste trabalho é feita a análise do impacto do fenômeno atmosférico da turbulência sobre um enlace FSO, além de se considerar também outras fontes causadoras de perda de potência no sinal óptico: a atenuação atmosférica, a atenuação geométrica e o desalinhamento entre transmissor e receptor. Para isto, técnicas de modelagem da irradiância de feixes ópticos, em conjunto com as teorias que descrevem as referidas atenuações, são utilizadas em simulações computacionais em uma avaliação analítica.

Inicialmente, a estrutura básica que constitui a tecnologia FSO é apresentada, e a caracterização do feixe óptico é estudada. Em seguida, os principais fenômenos que afetam o canal de comunicação são analisados, onde a teoria utilizada para modelar as atenuações atmosférica e geométrica são mostradas, juntamente com as expressões necessárias para que estas sejam implementadas nas simulações.

Posteriormente, a modelagem da turbulência atmosférica é fornecida para os regimes de fraca, moderada e forte intensidade. Os modelos analíticos para o cálculo do vagueamento e do espalhamento do feixe são mostrados. A modelagem dos efeitos da cintilação é analisada através do uso da teoria modificada de Rytov. Uma análise do alargamento temporal que ocorre no pulso óptico ao se propagar em um meio turbulento também é realizada através de avaliação teórica.

Através da teoria apresentada, o canal FSO é implementado e simulado com o uso do programa OptiSystem, tanto para um modelo de FSO simples, quanto para um modelo que utiliza a técnica de multiplexação OCDMA com múltiplos usuários.

Em ambos os sistemas simulados, é analisado primeiramente um meio sem a presença de turbulência atmosférica, para uma possível comparação de viabilidade com os enlaces em meios turbulentos, cujas simulações também são apresentadas. Desta forma, é possível observar que a presença da turbulência no meio restringe o comprimento total do enlace, causando uma redução de mais de 300 metros na distância máxima permitida para a operação do sistema, dependendo dos parâmetros utilizados. Para o sistema básico, a penalidade devido à turbulência observada é de 3,79 dB. Para o sistema OCDMA, esta penalidade de potência é de 6,78 dB.

Também é mostrado que a presença de possíveis desalinhamentos no enlace afeta a viabilidade do sistema ao aumentar a atenuação geométrica. Ao considerar, além dos efeitos da turbulência, um desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y , a distância máxima do enlace já se reduz a 2,45 km no sistema básico e a 2,3 km no sistema OCDMA, para os parâmetros utilizados. As penalidades de potência devido à turbulência observadas neste caso são, respectivamente, de 3,07 dB e 5,02 dB. Nota-se também que uma pequena variação angular de 0,05 mrad no eixo de elevação no transmissor causa forte atenuação geométrica no feixe transmitido, limitando o comprimento do enlace a 1,71 km no sistema básico e a 1,65 km no sistema OCDMA, para os valores utilizados. Nestes casos, são observadas penalidades de potência devido à turbulência de 1,84 dB e 3,71 dB, respectivamente. Ao analisar um enlace FSO onde o transmissor possui 1 cm de deslocamento nos eixos x e y , além de um deslocamento angular de 0,05 mrad, a presença da turbulência reduz o comprimento máximo do enlace para 1,56 km no sistema básico e 1,51 km no sistema OCDMA, e penalidades de potência de 1,66 dB e 3,44 dB, respectivamente, são obtidas.

ABSTRACT

In this work, an analysis of the impact of atmospheric turbulence in a FSO link is performed. Besides, other sources of the optical signal power loss, such as atmospheric attenuation, geometric attenuation and transmitter and receiver misalignment are considered. In this case, optical beam irradiance modeling techniques are used in conjunction with the theory that describe the mentioned attenuations, and an analytical evaluation is carried out through computational simulations.

Initially, the basic structure of the FSO technology is presented and the optical beam characterization is studied. Afterwards, the main phenomena affecting the communication channel are analyzed. The theory used to model the atmospheric and geometrical attenuation is presented, along with the expressions needed to be implemented in the simulations.

Subsequently, the atmospheric turbulence modeling is provided for low, moderate and high intensity regimes. Analytical models for calculating beam wander and beam spreading are shown. The scintillation effect modeling is analyzed using the Rytov modified theory. Evaluation of the pulse temporal broadening as it propagates in a turbulent medium is also performed through theoretical analysis.

With the analyzed theory, the FSO channel is implemented and simulated using the OptiSystem software. Two models are implemented: a simple FSO channel and a FSO channel using OCDMA multiplexing technique for multiple users.

In both systems analysis, the FSO channel was firstly simulated without turbulence to be compared afterwards to the results for the channel operating in a turbulent medium. Thus, it is possible to observe that the presence of turbulence limits the total link length, causing a reduction of over 300 meters at the maximum distance allowed for the system operation, depending on the parameters used. For the simple system, the penalty due to the observed turbulence is 3.79 dB. In the OCDMA system, this power penalty is 6.78 dB.

It is also observed that the presence of possible misalignments in the link affects the system by increasing the geometric attenuation. When considering, in addition to the effects of turbulence, a misalignment of 3 cm in the x and y axes, the maximum link distance is reduced to 2.45 km in the basic system and to 2.3 km in the OCDMA system, for the used values. The power penalty due to turbulence observed in this case are, respectively, of 3.07 dB and 5.02 dB. It is also noted that a small angular variation of 0.05 mrad in the elevation axis in the transmitter causes a large geometric attenuation in the transmitted beam, limiting the length of the link to 1.71 km on the simple system and to 1.65 km on the OCDMA system, for the used parameters. In these cases, power penalties of 1.84 dB and 3.71 dB, respectively, are observed due to the turbulence. When analyzing a FSO link where the transmitter has 1 cm of displacement in x and y axes, and an angular displacement of 0.05 mrad, the presence of turbulence reduces the maximum link length to 1,56 km on the basic system and to 1.51 km in the OCDMA system. Power penalties of 1.66 dB and 3.44 dB, respectively, are obtained.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de comunicação óptica, que utiliza a atmosfera como meio de propagação é diferente dos meios confinados (como as fibras ópticas) e é chamado de enlace óptico no espaço livre (FSO – *Free-Space Optics*). A ideia de uma comunicação à distância que utiliza a luz como forma de carregar a informação não é algo recente. A ideia já era aplicada na Grécia antiga, na qual os sinais luminosos gerados pela reflexão do sol eram empregados com essa finalidade (OSORIO, 2005). Porém, é possível que, até mesmo anteriormente, tribos indígenas já utilizassem sinais de fumaça para comunicarem-se entre si.

Uma inovação importante neste tipo de comunicação foi a criação do telégrafo óptico por Claude Chappe (BOUCHET, 2006), muito utilizado no período da Revolução Francesa para promover a comunicação entre cidades francesas.

Posteriormente, no final do século XIX, foi desenvolvido por Graham Bell o fotofone (COLVERO, 2005). O aparato era capaz de transmitir voz e empregava uma tecnologia de óptica no espaço livre mais avançada e que foi de grande importância para o desenvolvimento das telecomunicações, inclusive servindo de base para a criação do telefone.

O avanço das comunicações ópticas foi possível graças à invenção do laser por Theodore Maiman em 1960 (FRIEDMAN, 2000), conjuntamente com a invenção das fibras ópticas em 1966. Assim, os primeiros *lightphone* da empresa Lightpointe foram desenvolvidos na década de 1960 por Erhard Kube (LIGHTPOINTE, Homepage), um precursor dos sistemas FSO atuais. Este dispositivo está ilustrado na FIG. 1.1.



FIG. 1.1 Erhard Kube utilizando um *lightphone* nos anos 60.

A tecnologia FSO, como conhecemos hoje, foi originalmente desenvolvida pelos militares e pela NASA. Sua aplicação permaneceu restrita às aplicações militares, pois os lasers antigos possuíam baixas potências (CURTIS, 2005). Porém, graças ao desenvolvimento das redes de telecomunicações e da enorme expansão das redes de fibra óptica instaladas pelas cidades do mundo, o desenvolvimento de novos tipos de lasers mais potentes foi impulsionado, abrindo caminho para o grande aumento de tráfego de dados, que pôde ser observado desde o final do século XX (AGRAWAL, 2002). Para que a tecnologia FSO pudesse acompanhar esse crescimento de tráfego de dados, decorrente da popularização da internet, os estudos visando o desenvolvimento deste sistema foram intensificados.

Atualmente, as comunicações por fibra óptica são dominantes na rede de longa distância (*Wide Area Network – WAN*) e na rede metropolitana (*Metropolitan Area Network – MAN*), devido à sua grande capacidade de transmissão de dados em relação às tecnologias tradicionais de transmissão por rádio, par trançado ou cabo coaxial (COELHO, 2008). O desenvolvimento das tecnologias de acesso não acompanhou todo o crescimento que houve no núcleo das redes (CURTIS, 2005), que acabou causando um efeito gargalo no acesso dos usuários aos serviços de banda larga que eram oferecidos.

Até mesmo nas grandes cidades do mundo, apenas uma pequena porcentagem dos edifícios comerciais possui uma conexão, através de fibra óptica, aos *backbones* de alta velocidade que por ali passam. Mesmo que estes prédios se situem a curtas distâncias destes *backbones* a conexão entre estes pretensos usuários e as grandes malhas de tráfego de dados ainda pode ser uma realidade difícil, pois isto demanda um alto orçamento e, muitas vezes,

um tempo de instalação que não é favorável às demandas das aplicações. Esta é uma dificuldade muito comumente encontrada nas malhas de dados urbanas, e é chamada de problema de última milha. Um dos incentivos à implementação da tecnologia FSO é resolver este problema, levando as altas taxas de dados dos *backbones* aos usuários finais, através da propagação pela atmosfera (WILLEBRAND, 2001). A FIG. 1.2 mostra um exemplo de uma rede FSO instalada em uma área urbana, como solução para o problema de última milha.

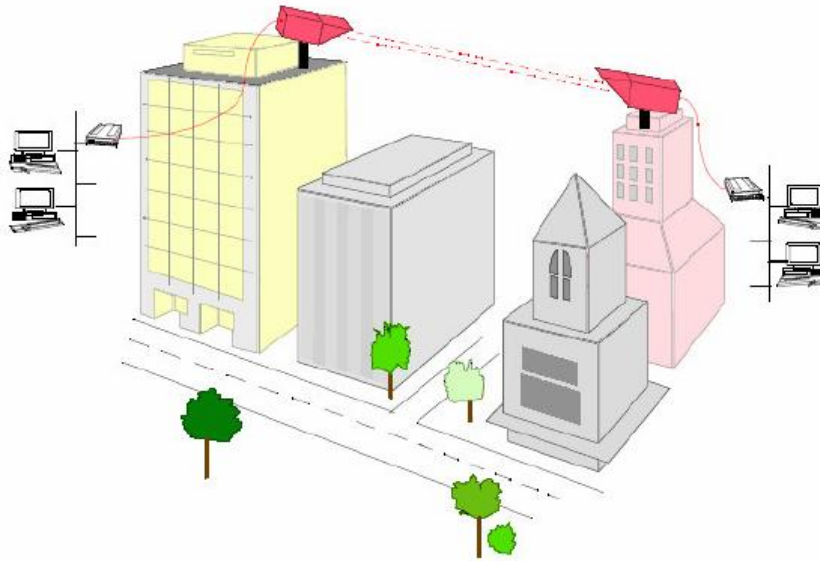


FIG. 1.2 FSO aplicado em uma rede (TJONDRONEGORO, 2005).

A tecnologia FSO é baseada na conectividade entre transceptores ópticos que utilizam uma fonte óptica e uma lente para transmitir a luz através da atmosfera até uma lente que recebe a informação. A lente receptora, então, conecta-se a um receptor de alta sensibilidade através de fibra óptica (LIGHTPOINTE, Homepage). São diversas as vantagens que incentivaram a sua adoção, como por exemplo, (MAHDY, 2004 e ARNON, 2003):

- Oferta de largura de banda elevada, da mesma ordem dos sistemas a fibra;
- Baixo custo, rapidez e facilidade na instalação do sistema, por dispensar grandes obras na viabilização dos meios de propagação, já que se trata de um sistema portátil e relativamente econômico;
- Possibilidade da instalação de enlaces temporários de acordo com a demanda, como por exemplo, na cobertura de feiras, eventos esportivos e missões militares;
- Grande segurança na utilização em comparação a outros sistemas sem fio e em rádio frequência (RF), pois é imune à interferência de outros sistemas de telecomunicações

ou sistemas elétricos, e até mesmo entre outros enlaces FSO instalados nas proximidades, devido à alta diretividade do feixe.

- Operação em faixas de frequência que não necessitam de licenciamento para o funcionamento.

Os transceptores FSO atuais da Lightpointe operam em uma taxa de transferência de dados de até 1,25 Gbps full-duplex para distâncias de até 1 km, suportando atenuações atmosféricas de até 17 dB/km. Porém, é previsto que, num futuro próximo, esta taxa poderá atingir até 10 Gbps, utilizando multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) (LIGHTPOINTE, Homepage). No entanto, a empresa Canon oferece uma outra opção, o dispositivo CanoBeam, que atinge taxas de 1,485 Gbps em enlaces de 1 km e em um meio com névoa leve (CANOBEAM, 2008).

Apesar de todas as vantagens já citadas anteriormente, algumas desvantagens da tecnologia FSO devem ser observadas, como a imprevisibilidade das condições atmosféricas no meio de propagação, a necessidade de um alinhamento minucioso entre o transmissor e o receptor para que a comunicação ocorra de forma apropriada (e a dificuldade que há para que se estabeleça esse alinhamento), a interferência solar que o feixe óptico sofre durante sua propagação em períodos diurnos, e o espalhamento pelo qual o feixe óptico está sujeito durante a comunicação.

Por usar o espaço livre como meio propagante, o sinal transmitido é exposto a diversas fontes de atenuação, e um projeto criterioso faz-se necessário. As principais causas de perdas de potência no sinal são (WILLEBRAND, 2001):

- (a) Perdas ópticas - devido a imperfeições na lente e outros componentes ópticos. Depende das características dos equipamentos e da qualidade das lentes. Seu valor é fornecido pelo fabricante.
- (b) Perdas atmosféricas – O projeto do enlace deve considerar fatores como temperatura e densidade do ar, além da composição do meio atmosférico, que contém partículas aéreas que geram absorção e espalhamento do feixe óptico.
- (c) Turbulência – É a presença de partículas e bolsões de ar que possuem diferentes índices de refração, decorrentes de diferenças de temperatura, umidade e pressão entre regiões no espaço-livre. As consequências da presença dessas células turbulentas no sinal são o vagueamento do feixe (*beam wander*), o espalhamento do feixe (*beam spreading*), e a cintilação.

- (d) Perdas geométricas – ao ser propagado na atmosfera, o sinal óptico sofre difração. Este fenômeno faz com que o feixe divirja e aumente a sua abertura inicial, se espalhando ao longo do caminho óptico. O efeito disto é que parte da irradiância do feixe não incide no receptor, causando uma atenuação.
- (e) Perdas de apontamento – são ocasionadas por um mau alinhamento entre transmissor e receptor, ou até mesmo pelo balançar da superfície dos prédios onde o sistema FSO encontra-se instalado. Isto pode ser contornado com um sistema de *tracking* para manter o alinhamento do sinal ou, para enlaces de pequenas distâncias, fazendo-se uso do fenômeno de divergência do feixe.

Os fenômenos de absorção e espalhamento possuem vasto estudo e um nível de compreensão avançado nos dias de hoje, sendo facilmente encontrados na literatura (ARNON, 2003). No entanto, a turbulência atmosférica é um fenômeno mais complexo, e que ainda motiva muitas pesquisas para aprimorar sua modelagem e compreensão, principalmente sobre o fenômeno da cintilação, cujo efeito pode ser citado como o mais significativo sobre o feixe óptico (DIOS, 2004).

A simulação dos efeitos da turbulência sobre o feixe óptico foi permitida graças à teoria desenvolvida por (KOLMOGOROV, 1941), o que possibilitou a análise do comportamento da irradiância em meios turbulentos. Essa modelagem dos fenômenos da turbulência foi aprofundada (FANTE, 1975 e TATARSKI, 1971) para melhor adequar a teoria de meios turbulentos para a tecnologia FSO de forma prática. O estudo sobre o tema continua se intensificando ao longo dos anos (OSORIO, 2005, COELHO, 2008, DOS SANTOS, 2008, RODRIGUES, 2012 e CARNEIRO, 2013).

Efeitos como o vagueamento e o espalhamento do feixe óptico foram estudados por muitos autores (DIOS, 2004 e RECOLONS, 2007), que obtiveram expressões importantes para modelar estes fenômenos em enlaces FSO. O fenômeno da cintilação ainda é motivo de muitos estudos. Através da teoria de Kolmogorov, modelagens estatísticas complexas foram realizadas, como o modelo de distribuição gama-gama (RODRIGUES, 2012). No entanto, o índice de cintilação em um meio turbulento também pode ser representado por modelos analíticos, como apresentado em (DORDOVA, 2010).

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como objetivo o estudo, a análise e a modelagem de enlaces FSO, considerando as possíveis fontes de atenuação do sinal óptico que estão presentes no meio físico de propagação do sinal, a atmosfera terrestre. Além disso, modelos analíticos para a simulação e modelagem de meios com turbulência de fraca a forte, considerando as escalas interna e externa da mesma, serão descritos e analisados. Para isto, os efeitos de vagueamento do feixe (*beam wander*), espalhamento do feixe (*beam spreading*) e cintilação são estudados, além de outros efeitos no feixe induzidos pela ação da turbulência, como o alargamento temporal do pulso óptico e as atenuações que ocorrem no sinal devido a possíveis desalinhamentos entre o transmissor e o receptor.

1.2 MOTIVAÇÃO

Neste trabalho optou-se por analisar e simular sistemas simples e de aplicação prática de comunicações FSO considerando, principalmente, os efeitos da turbulência atmosférica, da atenuação atmosférica e também de perdas geométricas que ocorrem devido a possíveis desalinhamentos entre o transmissor e o receptor óptico. Além disso, esta análise foi aplicada em um sistema relativamente mais complexo, que utiliza a técnica óptica de múltiplo acesso por divisão de código (OCDMA – *Optical Code Division Multiple Access*). Os resultados foram analisados através de simulações realizadas no software *OptiSystem*, da empresa Optiwave, disponível no Laboratório de Fotônica do IME.

Ademais, outra motivação para este trabalho é que ele se insere no projeto: “Estudo e Desenvolvimento de Enlace Óptico no Espaço Livre e de Sensores a Fibra Óptica” – EDITAL Bolsa de Produtividade em Pesquisa - CNPq.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 deste trabalho apresenta a fundamentação teórica relacionada aos elementos básicos de um sistema FSO, utilizada para modelagem do enlace.

Através da teoria apresentada, as condições atmosféricas de um meio, inclusive a turbulência, podem ter sua simulação realizada, e o estado do meio de transmissão avaliado para determinar as condições de funcionamento de um enlace FSO através da taxa de erro de bits (BER – *Bit Error Rate*).

O capítulo 3 mostra como a teoria, apresentada no capítulo 2, é utilizada nas simulações do enlace FSO, realizadas através de implementação nos softwares *OptiSystem* e MATLAB.

No capítulo 4, os resultados das simulações de um enlace FSO são apresentados e discutidos, tanto para um modelo de enlace simples, quanto para um modelo que utiliza multiplexação OCDMA, onde os impactos da turbulência e do desalinhamento entre transmissor e receptor são verificados.

A conclusão é apresentada no capítulo 5. O trabalho realizado é sumarizado, dando margem a soluções e ideias para trabalhos futuros. Neste capítulo também são apresentadas as publicações submetidas com os resultados deste trabalho.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, a teoria necessária para o estudo, a análise e a modelagem de um canal FSO será apresentada. Nesta análise, as principais fontes de atenuação no sinal óptico que se propaga na atmosfera serão descritas, com um foco maior na descrição do impacto causado pela turbulência sobre o feixe óptico, que é o objetivo principal deste trabalho. Para introduzir estes fundamentos teóricos, os aspectos básicos de um sistema FSO são, primeiramente, apresentados.

2.1 ELEMENTOS BÁSICOS DO SISTEMA

Um enlace FSO é composto por três elementos principais: transmissor, receptor e canal de propagação. A forma como estes elementos são dispostos é mostrada na FIG. 2.1.

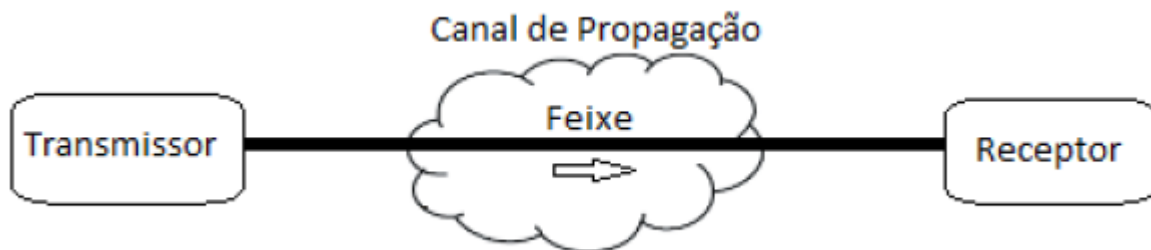


FIG. 2.1 Elementos principais de um enlace FSO (RODRIGUES, 2012).

O transmissor é o elemento responsável pela geração do feixe de luz. Através de uma fonte óptica e um telescópio, gera-se o feixe óptico a ser transmitido no canal de propagação, utilizando-se de uma determinada potência de transmissão como parâmetro principal. Também é descrito pelas perdas de inserção nele existentes, além da taxa de transmissão e do diâmetro da sua lente.

Já o receptor é composto por um telescópio e um fotodetector. É o elemento responsável pela detecção da potência óptica que chega ao plano de recepção, para que seja convertida em

corrente elétrica e utilizada pelo usuário. É descrito, principalmente, pela sensibilidade, que indica a potência mínima que pode ser detectada, além do seu diâmetro e das perdas de inserção nele presentes. Neste trabalho, tanto o receptor quanto o transmissor utilizados para as simulações possuem um diâmetro de 10 cm, pois estes são amplamente utilizados comercialmente.

No caso da tecnologia FSO, o canal de propagação é a própria atmosfera terrestre, por onde o feixe óptico se propaga. Um meio de transmissão é caracterizado, principalmente, pela distância do enlace e pelas atenuações que serão impostas ao feixe devido à absorção e ao espalhamento atmosférico, e também do nível de turbulência. Neste trabalho, estes fenômenos que descrevem o meio óptico serão avaliados com o objetivo de possibilitar uma compreensão do meio de transmissão.

2.2 INTENSIDADE ÓPTICA

É chamada de irradiância, ou de intensidade óptica, a magnitude usada para descrever a energia por unidade de superfície de um feixe luminoso (SALEH, 1991). Nesta seção, serão mostrados e analisados dois tipos de aproximações utilizadas para descrever a distribuição de intensidade em um feixe.

2.2.1 INTENSIDADE ÓPTICA COM DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA

Um feixe óptico que se propaga no espaço livre pode ser aproximado por um perfil de intensidade gaussiano que corresponde, teoricamente, ao modo transversal eletromagnético fundamental (TEM_{00}) (CVI MELLE'S GRIOT, 2009). Sua distribuição de intensidade apresenta um máximo de intensidade no seu centro, e decairá gradativamente ao se afastar deste centro por um dado raio e decairá gradativamente ao se afastar deste centro por um dado raio, como pode ser observado na FIG. 2.2.

Ao atingir um determinado raio de afastamento do centro do eixo do feixe óptico, a intensidade, que se aproxima assintoticamente de zero, torna-se pequena o suficiente para ser desprezada.

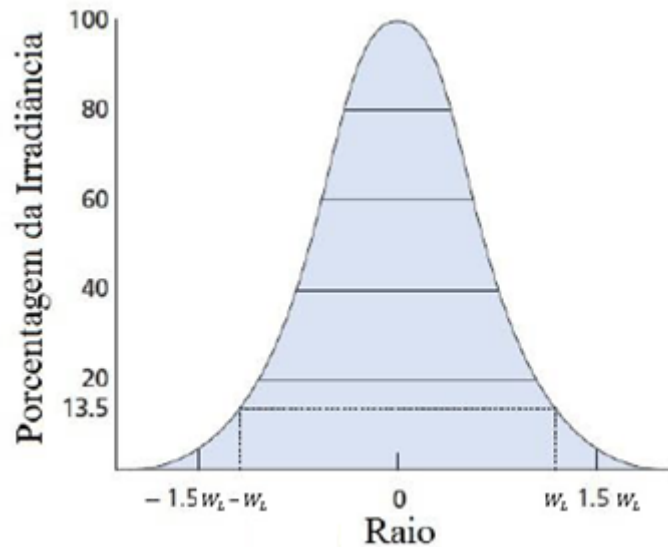


FIG. 2.2 Perfil de irradiância de um pulso Gaussiano (CVI MELLES GRIOT, 2009).

Neste caso, o raio efetivo do feixe após se propagar por uma distância L , chamado de W_L , é a região delimitada entre o ponto de máxima irradiância (I_0) até a região da seção reta onde o campo da irradiância é igual a $1/e^2$ do seu valor máximo (RODRIGUES, 2012). Portanto, a irradiância, ou intensidade óptica de um feixe gaussiano, é dada por (TRISNO, 2006):

$$I(r, L) = I_0 \frac{W_0^2}{W_L^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{W_L^2}\right) \quad \text{EQ. 2.1}$$

no qual W_0 é o raio do feixe no plano do transmissor e r é a distância radial do centro do feixe, onde a intensidade é calculada. A intensidade óptica é uma propriedade do feixe, mas o que será detectado de fato na recepção será a potência óptica P_{RX} , integrada na área S do fotodiodo (POLIAK, 2013):

$$P_{RX} = \int_S I(x, y, z) dS \quad \text{EQ. 2.2}$$

Ao resolver a integral de superfície da EQ. 2.2, a seguinte expressão da potência recebida é obtida (POLIAK, 2013):

$$P_{RX} = \frac{\pi}{2} W_L^2 I(0,0,z) \left\{ 1 - \exp \left[-2 \frac{W_R^2}{W_L^2} \right] \right\} \quad \text{EQ. 2.3}$$

Onde W_R é o raio do receptor. O valor da EQ 2.3 nunca excederá o valor da potência transmitida, pois o termo entre chaves sempre é positivo e menor do que 1. Portanto, este termo também pode ser visto como a atenuação devido à restrição do feixe pelo tamanho finito do receptor (POLIAK, 2013).

2.2.2 DISTRIBUIÇÃO UNIFORME

Na modelagem de um feixe óptico que se propaga no espaço-livre, uma distribuição uniforme da intensidade presente na seção reta do feixe, após propagar-se por determinada distância, pode ser utilizada, como simplificação. Neste tipo de distribuição, a intensidade será igualmente distribuída por toda a área do feixe, e é igual a zero na região fora dele. Portanto, a potência óptica incidente numa área A será definida por (BOUCHET, 2006):

$$P_A = I_A \cdot A \quad \text{EQ. 2.4}$$

onde I_A é a irradiância incidente na área A . Após sofrer a difração, o campo da irradiância assume a forma conhecida como *top-hat*, pois assemelha-se ao formato de um chapéu. Isso pode ser observado na FIG. 2.3, onde I_t e I_{SR} são as irradiâncias no transmissor e em uma seção reta do feixe após se propagar por uma distância z , respectivamente.

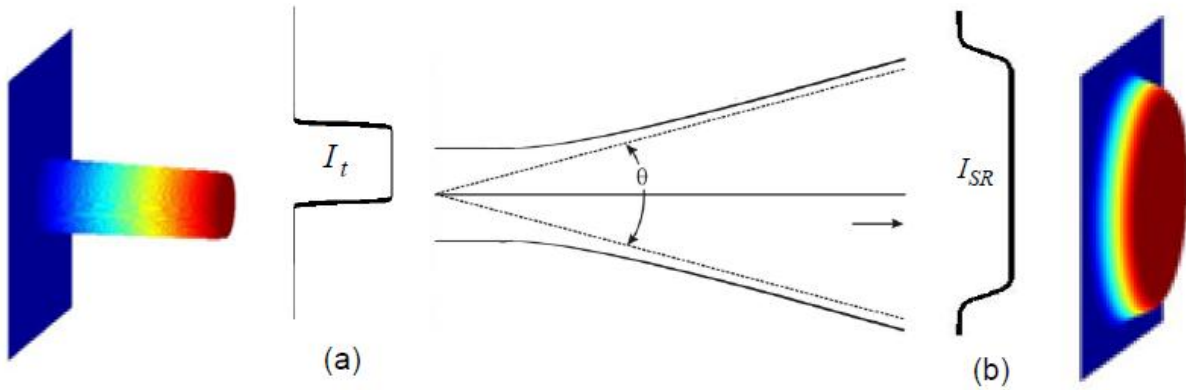


FIG. 2.3 Campo de irradiância antes (a) e depois da propagação (b) de um feixe com distribuição de irradiância uniforme (RODRIGUES, 2012).

2.3 FENÔMENOS NO ESPAÇO LIVRE

Diferentemente de uma comunicação que utiliza meios confinados, como canal de propagação, um sistema FSO está sujeito a diferentes fontes de atenuação do sinal óptico. Isso porque a atmosfera é um meio cujo comportamento possui uma grande aleatoriedade. Esta apresenta alta variação temporal e composição diversa, mudanças de temperatura, densidade, pressão, além de condições meteorológicas adversas que podem afetar gravemente ou até impossibilitar o funcionamento do sistema. Portanto, a atmosfera pode ser caracterizada como um meio de alta complexidade (RODRIGUES, 2012).

Serão avaliadas e analisadas neste trabalho a atenuação atmosférica, a atenuação geométrica, e a atenuação devido à turbulência, além da atenuação causada por desalinhamento entre o transmissor e o receptor.

2.3.1 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

A atmosfera é composta de uma mistura de diferentes tipos de gases e aerossóis. A presença destas partículas de diversas substâncias na atmosfera afeta diretamente o sinal de uma comunicação FSO, mas de maneiras diferentes. Portanto, a atenuação atmosférica será o

resultado da interação do feixe óptico com estas moléculas e aerossóis durante a sua propagação, ocasionando numa redução da potência que é captada pelo receptor. Os principais efeitos dessas interações são a absorção e o espalhamento do feixe óptico (CARNEIRO, 2013).

A atenuação atmosférica que é sofrida por um feixe óptico em um enlace FSO durante a propagação é regida e descrita pela Lei de Beer-Lambert (BLOOM, 2003). A expressão que possibilita a modelagem dos efeitos da atenuação atmosférica que o sinal sofre durante a propagação é descrita por (KIM, 1998):

$$\alpha_{atm} = -10\log\left(\frac{P(L)}{P(0)}\right) \quad \text{EQ. 2.5}$$

onde α_{atm} é o coeficiente de atenuação atmosférica do feixe óptico (em dB/km), definido como a razão entre a potência óptica após a propagação na atmosfera por uma distância L , $P(L)$, e a potência óptica inicial, $P(0)$. A razão entre as potências descritas pela EQ. 2.5 pode ser escrita na forma (CARNEIRO, 2013):

$$\frac{P(L)}{P(0)} = e^{-\gamma \cdot L} \quad \text{EQ. 2.6}$$

onde γ é o coeficiente de atenuação atmosférica (em km^{-1}) de um enlace de distância L , dado pelo somatório dos coeficientes de absorção e espalhamento (WILLEBRAND, 2001):

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad \text{EQ. 2.7}$$

onde α_m é o coeficiente de absorção molecular, α_a é o coeficiente de absorção por aerossóis, β_m é o coeficiente de espalhamento molecular e β_a é o coeficiente de espalhamento por aerossóis.

2.3.1.1 ABSORÇÃO

A absorção atmosférica é um fenômeno que resulta na redução da irradiância do feixe óptico, pois a interação do mesmo com alguns gases, entre outros constituintes atmosféricos, resulta na absorção de parte da potência do feixe na forma de calor (PINTO, 2003).

A interação entre os gases e o feixe óptico gera uma atenuação diferente no sinal, dependendo do comprimento de onda que é empregado. Esta relação pode ser observada na FIG. 2.4, que apresenta o espectro de transmitância atmosférica para a faixa do visível e do infravermelho.

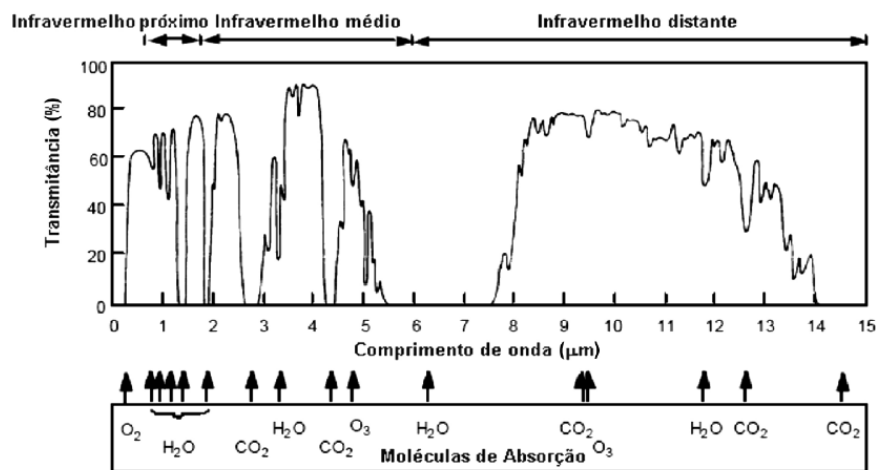


FIG. 2.4 Janelas de transmitâncias atmosféricas (COLVERO, 2005).

Os átomos e moléculas na atmosfera são caracterizados pelo seu índice de refração. A parte imaginária do índice de refração, k_i , relaciona-se com o coeficiente de absorção, α , pela expressão (WILLEBRAND, 2001):

$$\alpha = \frac{4\pi k_i}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad \text{EQ. 2.8}$$

onde λ é o comprimento de onda do feixe óptico, σ_a é a seção transversal da partícula responsável pela absorção em questão, e N_a é a concentração de partículas absorventes. Sendo assim, o coeficiente de absorção é dado em função do poder de absorção de uma partícula, bem como da densidade da mesma (WILLEBRAND, 2001).

2.3.1.2 ESPALHAMENTO

Diferentemente da absorção, o fenômeno do espalhamento não causa uma redução na intensidade óptica do feixe, mas sim um redirecionamento do mesmo. Isto afeta o apontamento do feixe entre transmissor e receptor e, portanto, torna possível que parte do feixe óptico transmitido não seja detectado na recepção. Desta forma, uma nova atenuação é imposta ao enlace.

Existem três tipos de espalhamento diferentes que afetam um sistema FSO causando atenuação atmosférica. Na FIG. 2.5, são ilustrados os tipos de diagramas de espalhamento resultantes da incidência do feixe de luz sobre partículas espalhadoras. Pode-se observar que o tipo de espalhamento que ocorre desta interação entre feixe e partícula depende da relação entre o comprimento de onda do feixe e o diâmetro da partícula espalhadora.

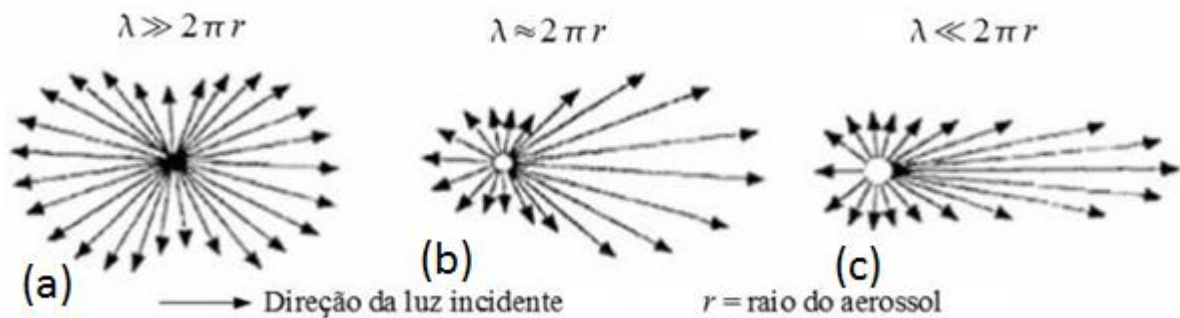


FIG. 2.5 Diagramas de espalhamento: (a) Rayleigh, (b) Mie e (c) Não-seletivo (COELHO, 2008).

Para realizar a comparação entre comprimento de onda e tamanho da partícula espalhadora e, então, definir que tipo de espalhamento ocorre, o parâmetro adimensional x_0 é apresentado (WILLEBRAND, 2001):

$$x_0 = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad \text{EQ. 2.9}$$

onde r é o raio da partícula e λ é o comprimento de onda do feixe.

Para um $x_0 \ll 1$, o espalhamento que ocorre é o Rayleigh, mostrado na FIG. 2.5 (a). É causado, principalmente, pelas moléculas constituintes da atmosfera (OSORIO, 2005).

Para um $x_0 \approx 1$, o espalhamento estará no regime Mie, cujo diagrama é ilustrado na FIG. 2.5 (b). É causado por gotículas de água suspensas na atmosfera. Seu lóbulo secundário, apesar de bem pronunciado, é menor do que no espalhamento Rayleigh.

O espalhamento não seletivo ocorre quando $x_0 \gg 1$. Este tipo de espalhamento possui influência mínima no comprimento de onda, e pode ser contornado através do uso de óptica geométrica. É causado por gotas de águas de grandes dimensões, como ocorre em condições de chuva, por exemplo (BOUCHET, 2006).

O valor médio do raio das partículas de neblina possui aproximadamente o mesmo tamanho dos comprimentos de onda normalmente utilizados em enlaces FSO. Por este motivo, a neblina é considerada um dos maiores causadores de atenuações na propagação do feixe óptico. Por outro lado, as partículas de chuva e de neve são maiores, e por este motivo representam uma dificuldade menor para o feixe (WILLEBRAND, 2001). Portanto, devido ao fato do espalhamento Mie ser muito mais significativo do que os outros termos da EQ. 2.7, esta expressão pode ser simplificada apenas por $\gamma = \beta_a$.

Para calcular a atenuação atmosférica devido ao espalhamento Mie, uma expressão empírica tem sido amplamente utilizada (WEICHEL, 1990):

$$\gamma = \beta_a = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-s} \quad \text{EQ. 2.10}$$

onde V é visibilidade, λ é o comprimento de onda em nm, e s é o coeficiente de distribuição do tamanho das partículas, descrito pela EQ 2.11. Este coeficiente possui diferentes valores dependendo da visibilidade do ambiente em questão (KIM, 1998).

$$s = \begin{cases} 1,6 & , \text{ para } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & , \text{ para } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,568V^{-1/3} & , \text{ para } V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad \text{EQ. 2.11}$$

Dados de visibilidade foram coletados durante décadas, principalmente em aeroportos, e estão disponíveis em serviços de condições climáticas, e podem então ser usados para se determinar a dependência da visibilidade no funcionamento de um enlace FSO para uma determinada região (WILLEBRAND, 2001).

2.3.2 ATENUAÇÃO GEOMÉTRICA

O princípio de Huygens diz que um ponto pertencente à frente de uma onda atua como uma nova frente de onda. O fenômeno da difração é regido por este princípio. Como a onda de interesse para este estudo é a onda luminosa, a difração faz com que estas ondas divirjam, promovendo então um aumento da abertura do feixe ao longo do caminho óptico (RODRIGUES, 2012).

Devido a essa difração, mesmo que o laser transmissor gerasse um feixe perfeitamente colimado, ocorreria uma divergência do feixe na atmosfera (CARNEIRO, 2013). Portanto, a área da seção reta do feixe aumenta com a distância a partir da cintura do feixe. O raio limitado pela difração de um feixe óptico é dado por (ANDREWS, 2005):

$$W_L = W_0^2 \left[\left(1 - \frac{L}{F_0}\right)^2 + \left(\frac{2L}{kW_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{EQ. 2.12}$$

onde W_0 é o raio do feixe no plano do transmissor, F_0 é o foco geométrico do feixe (ou raio de curvatura frontal), L é a distância do enlace e $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda. λ é o comprimento de onda. O valor do foco geométrico F_0 determina se o feixe é convergente ($F_0 > 0$), colimado ($F_0 \approx \infty$) ou divergente ($F_0 < 0$). A FIG. 2.6 mostra a relação entre F_0 , o raio do feixe no plano do transmissor W_0 e a distância de propagação z .

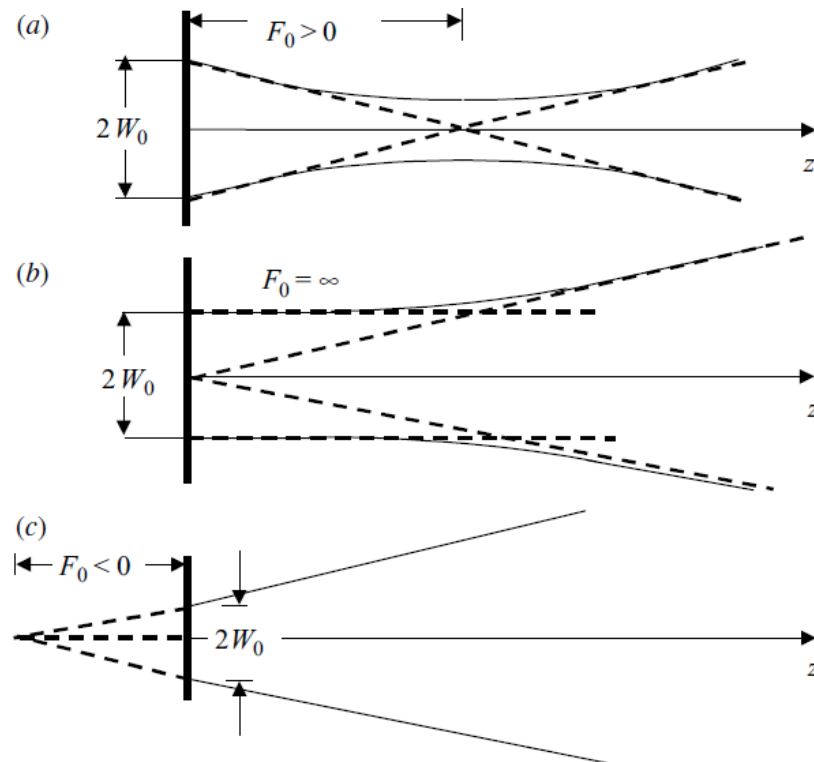


FIG. 2.6 (a) Feixe convergente, (b) feixe colimado, e (c) feixe divergente (ANDREWS, 2005).

Na FIG. 2.7 observa-se o formato cônico que um feixe colimado assume ao se propagar pela atmosfera devido ao fenômeno da difração.

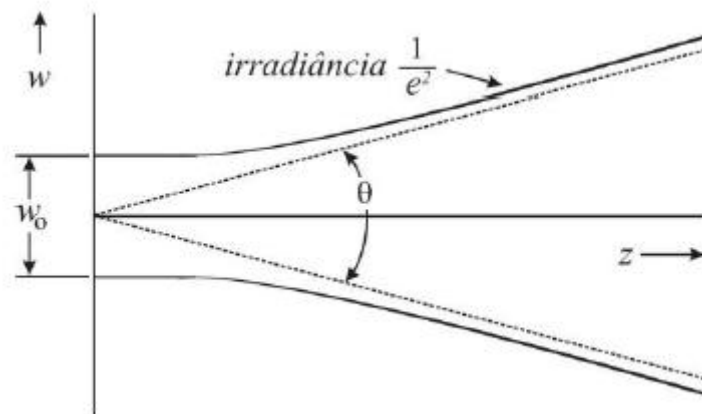


FIG. 2.7 Formação do cone de divergência devido à difração (DOS SANTOS, 2008).

Na FIG. 2.7 estão descritos o ângulo de divergência θ , o raio do feixe no plano do transmissor W_0 e a abertura assumida pelo feixe ao ser difratado.

A atenuação geométrica é definida como a razão entre a área do receptor e área efetiva do feixe no plano de recepção, após ter sofrido difração ao longo do caminho óptico. A atenuação geométrica em um enlace FSO é definida como (CARNEIRO, 2013):

$$\alpha_{geom} = \frac{S_R}{S(L)} \quad \text{EQ. 2.13}$$

onde S_R é a área efetiva do receptor e $S(L)$ é a área da seção reta do feixe no plano do receptor.

Em um meio não-turbulento, onde considera-se apenas o efeito da difração sobre o feixe, e considerando que o transmissor e o receptor encontram-se perfeitamente alinhados, a atenuação geométrica é dada pela aproximação (BLOOM, 2003):

$$\alpha_{geom} = \frac{d_R^2}{(d_T + \theta \cdot L)^2} \quad \text{EQ. 2.14}$$

onde d_R é o diâmetro de abertura do receptor, d_T é o diâmetro de abertura do transmissor e θ é o ângulo de divergência, como ilustrado na FIG. 2.8.

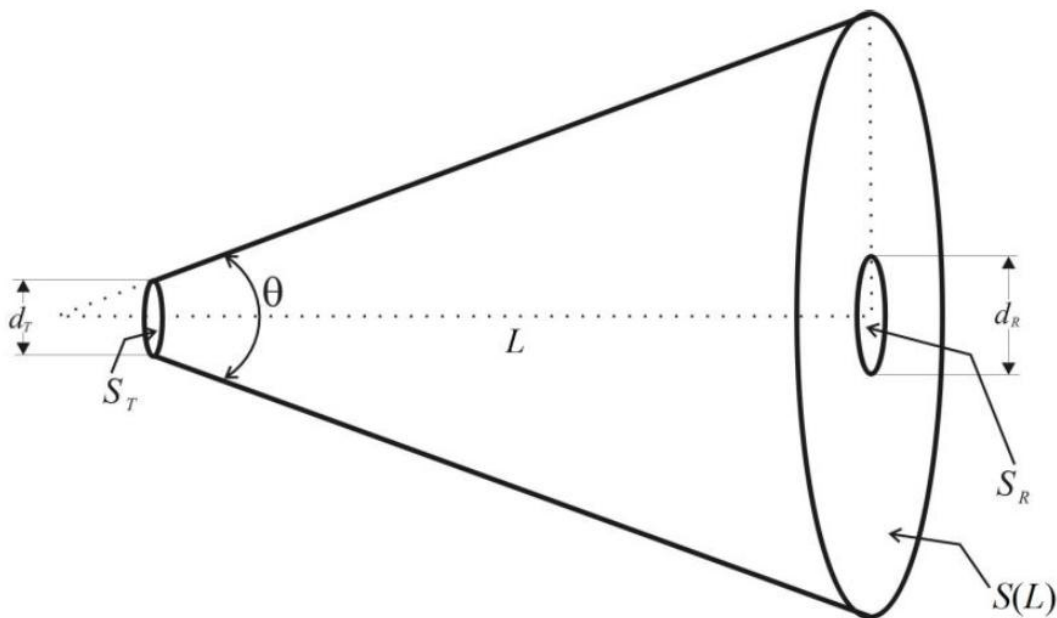


FIG. 2.8 Relação entre os parâmetros do feixe, do transmissor e do receptor (DOS SANTOS, 2008).

Porém, a EQ. 2.14 só é válida nos casos onde $d_R < d_T + \theta L$. Entretanto, nos casos em que $d_R \geq d_T + \theta L$, atinge-se uma situação em que a atenuação geométrica seria ≥ 1 , o que não é possível. Assim sendo, no caso onde $d_R \geq d_T + \theta L$, a atenuação geométrica será igual a 1. Isso significa que todo o feixe óptico que é irradiado pelo transmissor na atmosfera está sendo captado pelo receptor, ou seja, que não há atenuação geométrica neste enlace (BESSONI, 2015).

Em meios turbulentos, a área do feixe recebe um acréscimo além daquele ocasionado pela difração ao se propagar pela atmosfera, o que causa uma atenuação geométrica adicional. O efeito responsável por isto e sua análise serão mostrados nas próximas seções desta dissertação.

A EQ. 2.14 pode ser utilizada quando o transmissor e o receptor óptico estão perfeitamente alinhados. Porém, devido ao movimento dos prédios, deslocamentos de massas de ar e expansões térmicas, é possível que ocorra um desalinhamento entre o transmissor e o receptor (MOTLAGH, 2008). Por isso, nestes casos, uma abordagem diferente precisa ser considerada na avaliação da atenuação geométrica.

2.3.2.1 DESALINHAMENTO ENTRE TRANSMISSOR E RECEPTOR

Na ocorrência de desalinhamentos entre o transmissor e o receptor em um enlace FSO, a atenuação geométrica também é calculada através da EQ. 2.13. Porém, quando o transmissor e/ou o receptor sofrem um deslocamento angular (seja no azimute, na elevação, ou até mesmo em ambos), a área que é deslocada assume um formato elíptico no plano de interseção entre o feixe óptico e o receptor, divergindo do formato circular inicial, como mostra a FIG. 2.8, onde A_r e A_{SR} são as áreas efetivas do receptor e do feixe no plano da recepção, respectivamente, e A_r^P é a projeção de A_r em A_{SR} .

A FIG. 2.9 ilustra três situações diferentes possíveis quando há um desalinhamento entre o transmissor e o receptor. Na FIG. 2.9 (a), apesar do desalinhamento presente entre o transmissor e o receptor, a área resultante do feixe na recepção A_{SR} englobará toda a área do receptor A_r . Portanto, neste caso, o desalinhamento não causará atenuações geométricas adicionais.

Já no caso ilustrado pela FIG. 2.9 (b), o deslocamento do transmissor fará com que apenas uma parte da área do receptor capte o feixe óptico, o que gera atenuações geométricas adicionais. Nestes casos, apenas a área de interseção entre o feixe e o receptor deve ser considerada em $S(L)$ na EQ 2.13.

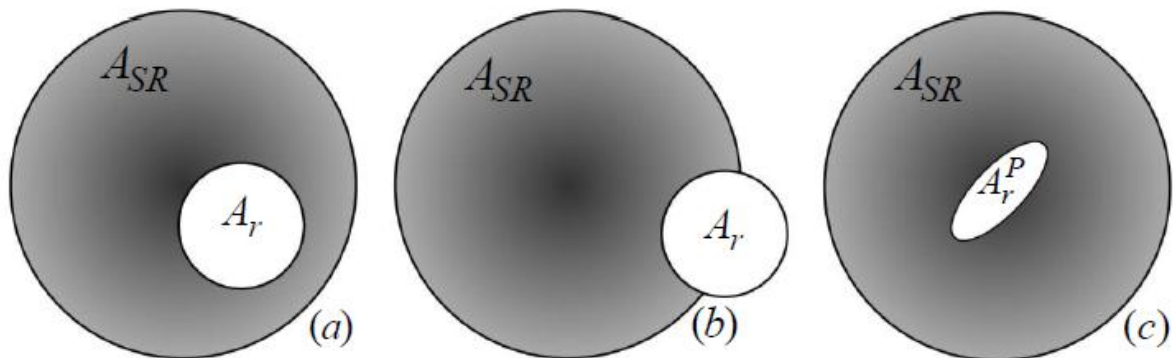


FIG. 2.9 Exemplos de desalinhamento na geometria entre o feixe (área cinza) e o receptor (área branca) (RODRIGUES, 2012).

Além disso, existem casos como o ilustrado pela FIG. 2.9 (c), onde uma variação angular ocorrida no receptor ou no transmissor faz com que a área efetiva de recepção se torne uma elipse, o que também gera perdas na detecção do sinal.

O método para o cálculo das atenuações geométricas em casos onde há desalinhamento varia conforme a distribuição de intensidade óptica que é considerada na modelagem do feixe.

2.3.2.1.1 DESALINHAMENTO LATERAL ENTRE O TRANSMISSOR E O RECEPTOR EM UM EIXO CONSIDERANDO UM FEIXE GAUSSIANO

A EQ. 2.14 é utilizada para o cálculo da atenuação geométrica em casos onde o transmissor e o receptor encontram-se perfeitamente alinhados. No entanto, na ocorrência de um desalinhamento lateral Δ , seja no eixo x ou no eixo y , entre transmissor e receptor, a potência recebida é dada por (POLIAK, 2013):

$$P_{RX}(\Delta) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} W_L I(0, z) \cdot \int_0^{r_R} \left\{ \exp\left[\frac{-2x^2}{W_L^2}\right] \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{2}}{W_L} \left(\Delta + \sqrt{W_R^2 - x^2}\right)\right] - \exp\left[\frac{-2x^2}{W_L^2}\right] \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{2}}{W_L} \left(\Delta - \sqrt{W_R^2 - x^2}\right)\right] \right\} dx$$

EQ. 2.15

de onde erf é a função erro, dada por (YANG, 2013):

$$\operatorname{erf}(v) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v e^{-t^2} dt$$

EQ. 2.16

Desta forma, a atenuação geométrica decorrente de um desalinhamento lateral Δ para feixes gaussianos é dada por:

$$\alpha_{geom} = \frac{P_{RX}(\Delta)}{P_{RX}}$$

EQ. 2.17

onde P_{RX} é o valor da potência que é obtida quando não há um desalinhamento axial presente.

2.3.2.1.2 DESLOCAMENTO ANGULAR DO TRANSMISSOR CONSIDERANDO UM FEIXE GAUSSIANO

Em um enlace FSO, o transmissor pode sofrer algum tipo de deslocamento angular devido a agentes externos. Este deslocamento pode ocorrer no ângulo de azimute, de elevação, ou em ambos, simultaneamente.

Ao deslocar o transmissor por um ângulo θ_T , uma atenuação adicional ocorrerá no enlace. Quanto maior for este ângulo, maior será a atenuação decorrente. O desvio Δ_T , ocasionado no feixe devido a este deslocamento angular é dado por (POLIAK, 2013):

$$\Delta_T = L \cdot \tan(\theta_T)$$

EQ. 2.18

onde L é o comprimento do enlace.

Ao substituir o Δ na EQ. 2.15 pelo Δ_T obtido pela EQ 2.18, a potência que é recebida após o deslocamento angular pode ser calculada. Portanto, neste caso, a atenuação adicional devido ao desalinhamento angular será dada por (POLIAK, 2013):

$$\alpha_{geom} = \frac{P_{RX}(\Delta_T)}{P_{RX}} \quad \text{EQ. 2.19}$$

2.3.2.1.3 DESLOCAMENTO ANGULAR DO RECEPTOR CONSIDERANDO UM FEIXE GAUSSIANO

O receptor FSO também pode sofrer um deslocamento angular capaz de atenuar o sinal transmitido, conforme ilustra a FIG. 2.9 (c). Portanto, ao ser deslocado do eixo de alinhamento de um ângulo θ_R , a atenuação adicional devido ao deslocamento angular no receptor é dada por (POLIAK, 2013):

$$\alpha_{RX} = \cos(\theta_R) \quad \text{EQ. 2.20}$$

onde θ_R é um ângulo qualquer que pertence ao intervalo entre -90° e 90° .

2.3.2.1.4 ATENUAÇÃO GEOMÉTRICA DEVIDO AO DESALINHAMENTO ENTRE TRANSMISSOR E RECEPTOR USANDO-SE FEIXE CÔNICO

Assim como no caso do feixe gaussiano, a atenuação geométrica em feixes cônicos é dada pela relação entre a área do feixe e a área do receptor que é irradiada pelo mesmo. Considerando-se os casos onde há um alinhamento perfeito entre o transmissor e o receptor óptico, a EQ. 2.14 pode ser utilizada para determinar a atenuação geométrica em um enlace. Porém, caso haja algum desalinhamento, este cálculo ganha uma maior complexidade, pois a área do feixe pode assumir um formato elíptico. Além disso, diferentemente do feixe gaussiano, toda a irradiância óptica neste caso estará limitada dentro da área definida pelo raio

do feixe, W_L . Portanto, para calcular a área efetiva do receptor, a área de interseção entre o feixe e o receptor precisa ser definida.

Para o cálculo da área de interseção desejada, um algoritmo que foi desenvolvido para calcular a área de interseção entre duas elipses (HUGHES, 2012) foi implementado e adaptado para o caso do cálculo da atenuação geométrica para um feixe cônico.

A área do feixe é descrita como $A_{SR} = \pi W_0^2$, por possuir um formato circular. Porém, quando o transmissor sofre um deslocamento angular, o feixe passa a ser visto como uma elipse no plano de recepção, como mostra a FIG. 2.10. A elipse é descrita pela equação polinomial:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \quad \text{EQ. 2.21}$$

onde A e B são os semieixos da elipse ao longo dos eixos x e y , respectivamente. Como foi visto no caso do feixe gaussiano, o transmissor pode ser deslocado nos eixos x e y , ou nos ângulos θ_{azim} e θ_{elev} , de azimute e elevação, respectivamente. Na ocorrência de um deslocamento angular, é necessário calcular o ângulo auxiliar δ :

$$\delta = \tan^{-1}[\sqrt{\tan^2(\theta_{azim}) + \tan^2(\theta_{elev})}] \quad \text{EQ. 2.22}$$

O ângulo δ representará a variação angular efetiva que é sofrida pelo feixe, caso o mesmo apresente um deslocamento simultâneo em θ_{azim} e θ_{elev} .

Apesar de ser referido como cônico, o feixe em questão possui, na verdade, o formato geométrico conhecido como tronco, onde a base menor é a área do transmissor, e a base maior é a seção reta do feixe após se propagar por uma distância L , como é ilustrado na FIG. 2.8. A fim de facilitar os cálculos a serem realizados, a distância L é virtualmente estendida para trás do transmissor, para que se possa trabalhar com uma geometria cônica de fato. A distância L corrigida é, então:

$$L_{cone} = L + \cos(\delta) + \frac{W_0}{\tan(\theta/2)} \quad \text{EQ. 2.23}$$

onde W_0 é o raio do transmissor e θ é o ângulo de divergência do feixe. Em seguida, são calculadas as dimensões auxiliares H e h . Estas dimensões auxiliares são as distâncias, sobre o plano de recepção, da projeção do vértice do cone até a borda mais distante da elipse e da projeção do vértice até a borda mais próxima, respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} H = L_{cone} \cdot \tan\left(\delta + \frac{\theta}{2}\right) \\ h = L_{cone} \cdot \tan\left(\delta - \frac{\theta}{2}\right) \end{array} \right\} \quad \text{EQ. 2.24}$$

Uma elipse pode ser definida pelos comprimentos dos seus semieixos, A_1 e B_1 , pelas coordenadas da localização do seu centro, h_1 e k_1 , e pelo seu ângulo de rotação φ_1 . Ao obter as dimensões auxiliares da EQ. 2.24, é possível então calcular o primeiro semieixo da elipse resultante do feixe, A_1 :

$$A_1 = \frac{H-h}{2} \quad \text{EQ. 2.25}$$

O semieixo A_1 e as dimensões auxiliares H e h , geradas após o deslocamento angular do transmissor, L e L_{cone} , δ e θ são ilustrados na FIG. 2.10.

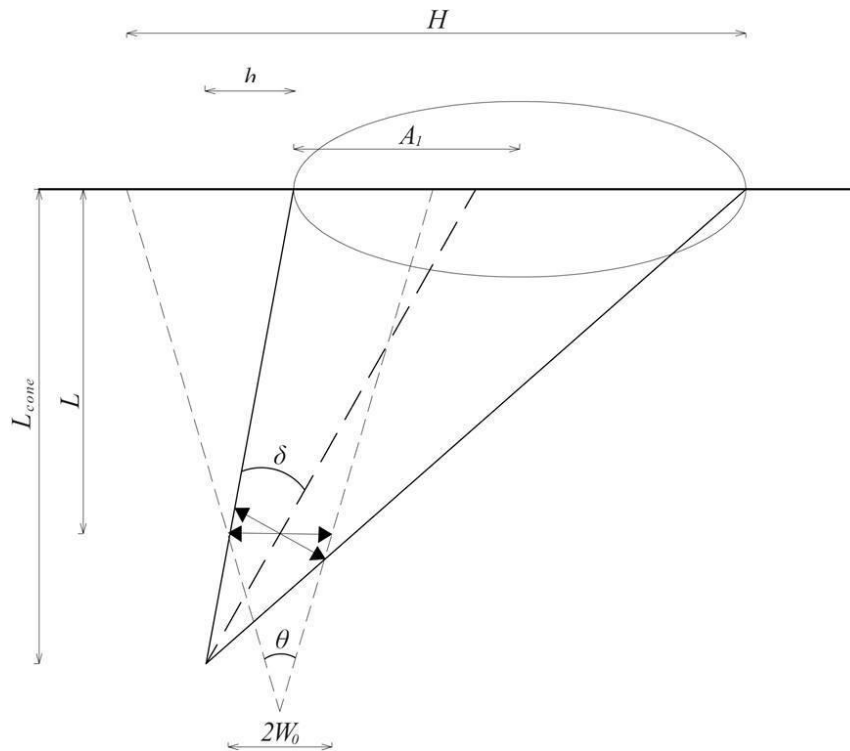


FIG. 2.10 Dimensões da elipse após o rotacionamento.

O próximo passo é calcular a distância auxiliar x_1 , que é o segmento que vai do centro da elipse até o ponto onde o eixo do feixe óptico intercepta o plano do receptor:

$$x_1 = A_1 + h - L_{cone} \cdot \tan(\delta) \quad \text{EQ. 2.26}$$

Através da FIG. 2.11 (a), é observado o local onde se situa a distância auxiliar x_1 , que é necessária para o cálculo do semieixo B_1 da elipse, e a FIG. 2.11 (b) amplia o triângulo retângulo presente na FIG 2.11 (a), mostrando que a distância $x_1 = \overline{C'O}$.

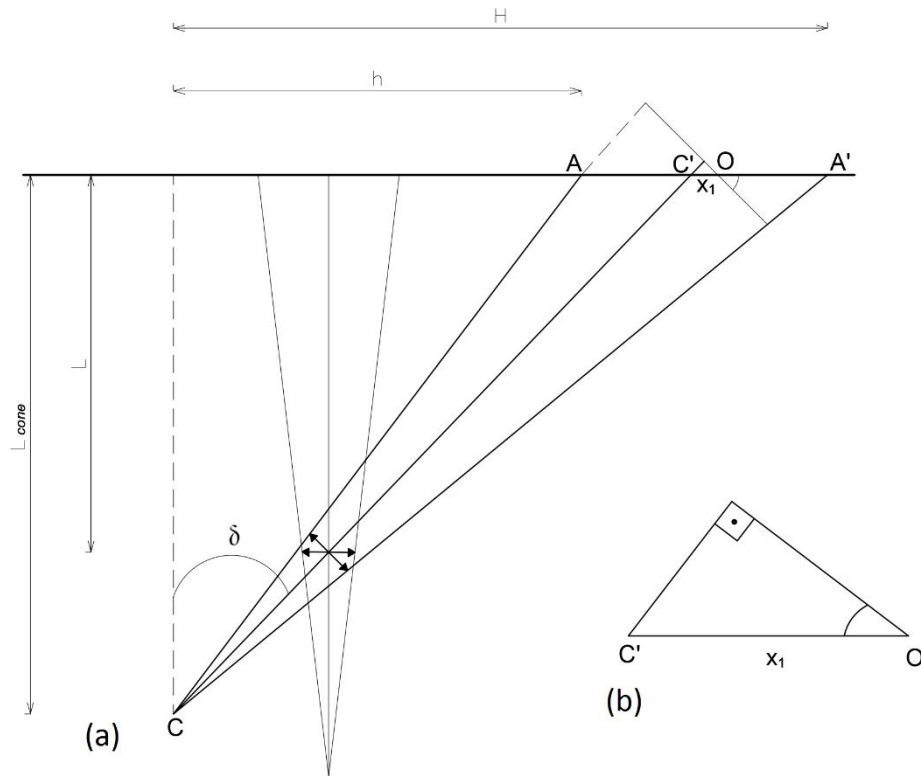


FIG. 2.11 Distância auxiliar x_1 após o rotacionamento.

Para determinar a área da elipse resultante, deve-se calcular o semieixo B_1 . Para isto, cria-se o valor auxiliar p , que é a distância percorrida pelo eixo do feixe luminoso:

$$p = \frac{L_{cone}}{\cos(\delta)} \quad \text{EQ. 2.27}$$

Cria-se também o valor auxiliar r_{circ} , que é o raio da circunferência que contém o semieixo menor da elipse:

$$r_{circ} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot [p + x_1 \sin(\delta)] \quad \text{EQ. 2.28}$$

O objetivo de se definir p e r_{circ} é utilizar estes valores para calcular o semieixo menor, B_1 , da elipse. É importante observar que a elipse e a circunferência consideradas para o cálculo não se encontram no mesmo plano, pois a circunferência se encontra em um plano perpendicular ao feixe luminoso. Desse modo, o semieixo B_1 pode finalmente ser calculado:

$$B_1 = \sqrt{r_{circ}^2 - x_1^2 \cos^2(\delta)} \quad \text{EQ. 2.29}$$

Dessa forma, com os dois semieixos, A_1 e B_1 , obtidos, a área da elipse resultante já pode ser calculada. Em seguida, deve-se determinar as coordenadas do centro da elipse, h_1 e k_1 . Para isto, é calculado o ângulo φ_1 , que o eixo maior da elipse forma com a horizontal (eixo x):

$$\varphi_{1(\theta_{elev}, \theta_{azim})} = \left\{ \begin{array}{l} \text{atan2}[\tan(\theta_{elev}), \tan \theta_{azim}], \text{ se } \theta_{elev} \geq 0 \\ 2\pi + \text{atan2}[\tan(\theta_{elev}), \tan \theta_{azim}], \text{ se } \theta_{elev} < 0 \end{array} \right\} \quad \text{EQ. 2.30}$$

onde atan2 é uma função computacional conhecida, utilizada para retornar o valor da tangente inversa nos quatro quadrantes. Após determinar o valor do ângulo φ_1 através da EQ. 2.30, pode-se calcular a coordenada h_1 do centro do feixe:

$$h_1 = \left[h + A_1 - \text{sen}(\delta) \cdot \frac{w_0}{\tan(\theta/2)} \right] \cdot \cos(\varphi_1) \quad \text{EQ. 2.31}$$

E também a coordenada k_1 que, junto com h_1 , define o centro do feixe no plano cartesiano:

$$k_1 = \left[h + A_1 - \text{sen}(\delta) \cdot \frac{w_0}{\tan(\theta/2)} \right] \cdot \text{sen}(\varphi_1) \quad \text{EQ. 2.32}$$

Tendo a elipse definida, deve-se deslocar o seu centro (a nível de aproximação matemática) para o centro do plano cartesiano (deslocando junto a área circular do receptor), para que seja possível realizar o cálculo da interseção entre as duas áreas. Sendo assim, tanto esta elipse quanto o círculo referente ao receptor serão transladados por uma quantidade ($-h_1, k_1$), e então ambos são rotacionados por um ângulo $-\varphi_1$, o que leva a elipse resultante do feixe óptico ao centro do plano cartesiano, conforme desejado.

Para realizar o cálculo da área de interseção entre a elipse resultante do deslocamento do feixe e a área do receptor, foram utilizados neste trabalho os códigos para cálculo de

interseção entre áreas de elipses elaborados por (HUGHES, 2012), presentes nos anexos deste trabalho.

Quando a área de interseção entre o feixe e o receptor (que será a área efetiva do receptor) for, finalmente, conhecida, a EQ. 2.13 pode ser utilizada para determinar a atenuação geométrica.

2.3.3 TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

A turbulência presente na atmosfera é causada pela existência de bolsões de ar nesse meio que possuem diferentes índices de refração entre si. Isto ocorre devido a diferenças significativas de temperatura, umidade e pressão entre regiões no espaço-livre (ANDREWS, 1999). Esta característica do meio provoca os fenômenos de difração e refração do feixe e, desta forma, a distorção da frente de onda luminosa. Estas diferenças no índice de refração causam desvios no feixe, como mostra a FIG. 2.12 e podem gerar erros de detecção em sistemas FSO (CARNEIRO, 2013).

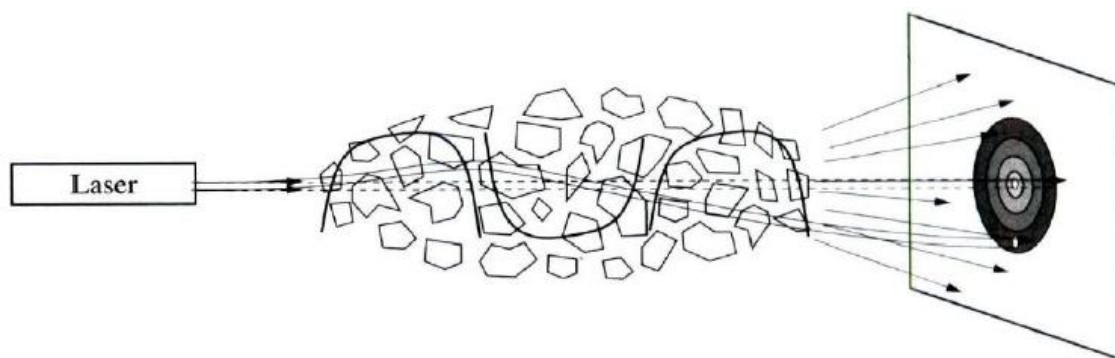


FIG. 2.12 Efeitos da turbulência no enlace FSO (BOUCHET, 2006).

Estudos da turbulência foram desenvolvidos para modelar a flutuação nos campos de velocidade de um fluido viscoso. Ao longo dos anos e após muitos estudos, a teoria de turbulência foi adaptada para descrever os efeitos atmosféricos sobre sistemas ópticos (ANDREWS, 2004). A teoria de Kolmogorov de fluxos turbulentos considera que qualquer meio viscoso e turbulento possui estruturas coerentes observáveis chamadas de turbilhões ou

células, onde as células de escalas maiores quebram-se e transmitem energia para as de escalas menores em um efeito cascata (RODRIGUES, 2012).

Para a caracterização de algo aleatório como o comportamento de células turbulentas, algumas características da atmosfera são adotadas na prática para o seu entendimento. A característica mais usada na descrição da turbulência é o parâmetro estrutural do índice de refração, C_n^2 , que representa a magnitude dos efeitos da turbulência na propagação do feixe óptico (COLVERO, 2005). A FIG 2.13 apresenta valores de C_n^2 que foram obtidos através de medições experimentais realizadas em 16 de fevereiro de 2003 na cidade do Rio de Janeiro, RJ, Brasil (OSORIO, 2005).

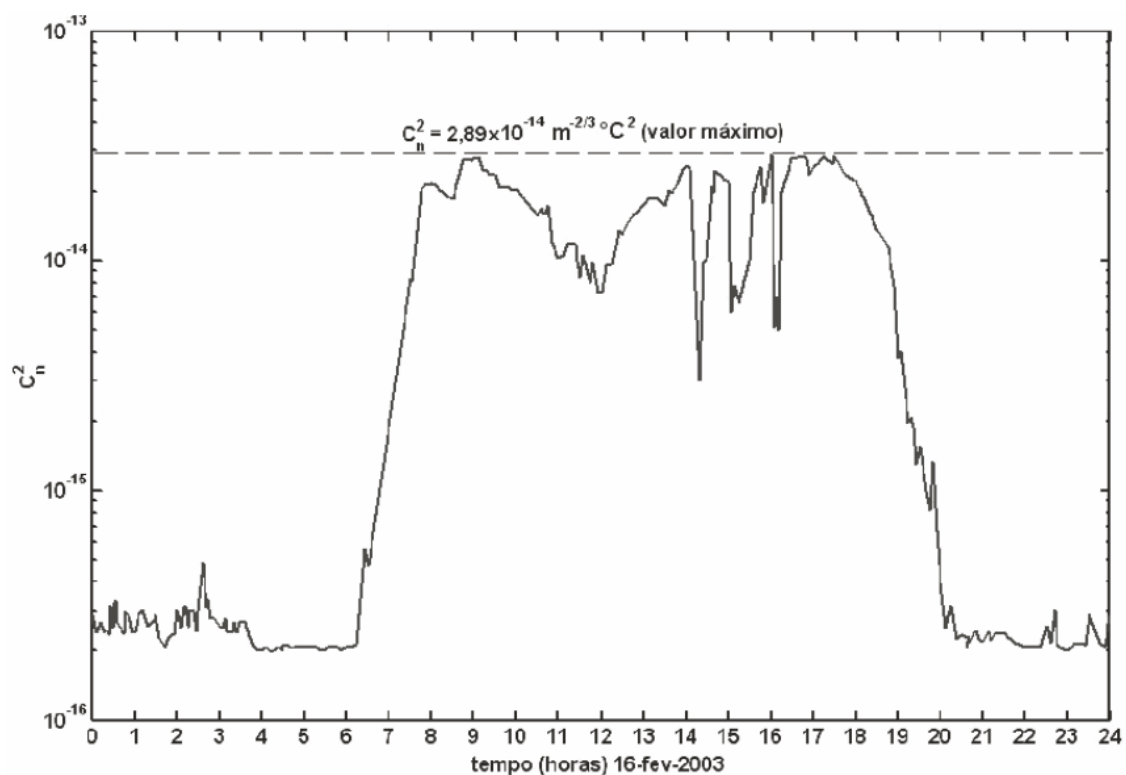


FIG. 2.13 Medidas experimentais de C_n^2 ao longo de um dia no Rio de Janeiro (OSORIO, 2005).

Na FIG. 2.13 é possível observar que o valor de C_n^2 é maior durante o dia, o que demonstra a forte influência das bolhas de ar quente na intensidade da turbulência. Para a modelagem da turbulência em um meio, um valor constante de C_n^2 é normalmente utilizado de acordo com a hora do dia em um determinado local.

Em um meio, o tamanho máximo das células turbulentas presentes é definido como escala externa da turbulência L_0 . Analogamente, também é definido um tamanho mínimo para estas células l_0 , definido como escala interna da turbulência (ou escala de Kolmogorov). O conjunto de células limitadas entre a escala externa e a escala interna da turbulência é chamado de subfaixa inercial (ANDREWS, 2005).

A FIG. 2.14 ilustra o que ocorre na atmosfera entre o feixe que se propaga e as células da subfaixa inercial. Ao irradiar as células turbulentas maiores, o feixe sofre um espalhamento, mas pouca parte da sua irradiância é afetada. Devido a forças inerciais que agem nestas células, elas serão quebradas em partículas cada vez menores, devido ao fenômeno chamado de cisalhamento (RODRIGUES, 2012). Ao interagir com as células da escala interna da turbulência, o feixe não mais será espalhado, mas passa a ter sua energia dissipada por estas células na forma de calor (VETELINO, 2005), o que gera uma atenuação na potência do sinal. A quebra das células turbulentas e a transferência de energia que ocorre entre elas é chamada de teoria da cascata de energia de Kolmogorov (SCHWIND, 1980).

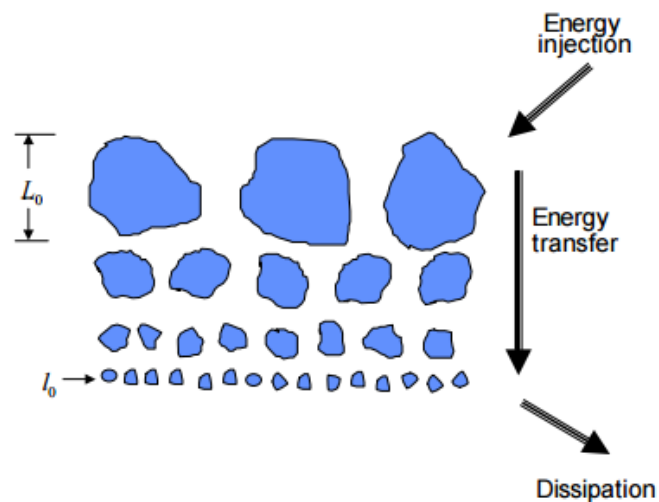


FIG. 2.14 Cascata de energia de Kolmogorov para turbulência atmosférica (ANDREWS, 2004).

A partir da teoria de Kolmogorov para meios turbulentos, modelos espectrais que descrevem flutuações no índice de refração podem ser formulados. É chamado de espectro de potência Φ_n a transformada de Fourier da função de covariância do índice de refração. Sua função é caracterizar a densidade espectral de potência para flutuações no índice de refração (ANDREWS, 2005).

Os modelos desenvolvidos são aplicados para diferentes valores da subfaixa inercial. O modelo utilizado atualmente é o espectro de potência de Kolmogorov (MILLER, 1994):

$$\Phi_n(\xi) = 0,033C_n^2\xi^{-11/3} \quad \text{EQ. 2.33}$$

onde ξ é a frequência espacial. Este espectro de potência é limitado à subfaixa inercial (em outras palavras, só é válido quando $1/L_0 \ll \xi \ll 1/l_0$). Como as escalas L_0 e l_0 ainda motivam muitos estudos para sua modelagem (WU, 2008), neste trabalho optou-se por modelar situações onde há pouca influência destes efeitos. Desta forma, os modelos de turbulência utilizados consideram $L_0 \approx \infty$ e $l_0 = 0$, que é possível conforme as simulações de (FLATTÉ, 1994). Porém, no caso da análise do alargamento temporal do pulso, foi utilizado $L_0 = 10$ m.

Com apenas a informação de C_n^2 não é possível obter uma definição correta da intensidade da turbulência, pois esta dependerá de outros fatores (RODRIGUES, 2012). Portanto, para determinar a intensidade com que o feixe será afetado pela turbulência em um meio, é definida a variância de Rytov, σ_R^2 , dada por (ANDREWS, 1999):

$$\sigma_R^2 = 1,23C_n^2k^{7/6}L^{11/6} \quad \text{EQ. 2.34}$$

onde k é o número de onda e L é o comprimento do enlace.

Um regime de turbulência em um meio pode ser descrito como possuindo fraca, média ou forte flutuação. Para a modelagem dos efeitos no feixe sob cada um destes regimes, diferentes equações são necessárias. O regime de turbulência é considerado de fraca flutuação quando $\sigma_R^2 < 1$, e de forte flutuação quando $\sigma_R^2 > 1$. Quando $\sigma_R^2 \approx 1$, o regime de turbulência é considerado moderado. Para descrever os efeitos do regime de turbulência moderada, as equações do regime de turbulência fraca podem ser utilizadas (ANDREWS, 2005). Geralmente, usa-se uma para o cálculo da turbulência.

Dentre os principais efeitos causados no feixe luminoso em decorrência da turbulência, destacam-se o vagueamento do feixe (*beam wander*), o espalhamento do feixe (*beam spreading*) e a cintilação, que são descritos a seguir.

2.3.3.1 VAGUEAMENTO DO FEIXE

Como resultado da presença de partículas de larga escala na atmosfera, deslocamentos aleatórios na largura do feixe decorrentes da exposição a curto prazo, ou seja, de um pequeno tempo de exposição, são observados no plano de recepção. É chamado de vagueamento do feixe o conjunto de deflexões aleatórias que ocorrem em um feixe durante sua propagação, sendo também um produto da turbulência na atmosfera. Porém, como o vagueamento do feixe é causado, principalmente, por partículas de larga escala, os efeitos da difração podem ser ignorados para qualquer diâmetro de recepção maior do que a zona de Fresnel (ou seja, quando $2W_0 > \sqrt{L/k}$) (ANDREWS, 2004). Pode-se considerar que, num meio de turbulência isotrópica, as variâncias ao longo dos eixos x e y são iguais, e que a variância da magnitude do deslocamento é o dobro da variância para um único eixo (ANDREWS, 2004).

É chamado de *hot spot* o ponto de maior irradiância no perfil do feixe. Ao avaliar o vagueamento do feixe, uma análise que considera, conjuntamente, o deslocamento do centroide do feixe e do *hot spot* pode ser feita (RECOLONS, 2007):

$$\langle r_c^2 \rangle = 7,25W_0^{-1/3} \times \int_0^L C_n^2(z) \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2 |1 - z/F_0|^{-1/3} dz \quad \text{EQ. 2.35}$$

onde W_0 é o raio do feixe no plano do transmissor, L é a distância total propagada, F_0 é a distância focal e $C_n^2(z)$ é o parâmetro estrutural do índice de refração em função de z . Este resultado é baseado no modelo do espectro de potência de Kolmogorov, dado pela EQ. 2.33. Para um C_n^2 constante, $\langle r_c^2 \rangle$ se reduz a:

$$\langle r_c^2 \rangle = \begin{cases} 2,42C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} F_{21}\left(\frac{1}{3}, 1; 4; \frac{L}{F_0}\right) & , \frac{L}{F_0} \leq 1 \\ 0,54C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{F_0}{L}\right)^3 \left[9 + \frac{4L}{F_0} \left(\frac{5L}{F_0} - 6\right) + 9 \left(\frac{L}{F_0} - 1\right)^{\frac{8}{3}}\right] & , \frac{L}{F_0} > 1 \end{cases} \quad \text{EQ. 2.36}$$

no qual F_{21} é a função hipergeométrica de Gauss, definida como (ANDREWS, 1997):

$$F_{21}(a, b, c; x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a)_n (b)_n}{(c)_n} \frac{x^n}{n!}, \quad |x| < 1 \quad \text{EQ. 2.37}$$

e os termos entre parêntesis da EQ. 2.37 representam símbolos de Pochhammer, dados por:

$$(a)_n = \frac{\Gamma(a+n)}{\Gamma(a)} , n = 0, 1, 2 \dots \quad \text{EQ. 2.38}$$

onde Γ é a função gama. Para o caso específico de um feixe perfeitamente colimado, ou seja, quando $F_0 \approx \infty$, o último termo do argumento da função hipergeométrica de Gauss F_{21} se iguala a 0. Portanto, neste caso, o vagueamento do feixe será descrito por (ANDREWS, 2005):

$$\langle r_c^2 \rangle_{col} = 2,42 C_n^2 W_0^{-1/3} L^3 \quad \text{EQ. 2.39}$$

Já para o caso específico que considera um feixe focado no plano do receptor, ou seja, quando $F_0 = L$, o último termo do argumento da função hipergeométrica de Gauss F_{21} se iguala a 1, e a expressão que descreve o vagueamento do feixe assume a forma (ANDREWS, 2005):

$$\langle r_c^2 \rangle_{foc} = 2,72 C_n^2 W_0^{-1/3} L^3 \quad \text{EQ. 2.40}$$

Porém, caso seja desejado separar do parâmetro $\langle r_c^2 \rangle$ apenas o valor absoluto referente ao deslocamento do centroide $\langle \beta_c^2 \rangle$, usa-se a relação (RECOLONS, 2007):

$$\langle \beta_c^2 \rangle = 0,56 \langle r_c^2 \rangle \quad \text{EQ. 2.41}$$

2.3.3.2 ESPALHAMENTO DO FEIXE

Um dos efeitos da turbulência atmosférica, o espalhamento do feixe (*beam spreading*) aparece no enlace FSO como um aumento na divergência do feixe. Isto ocorre pois, em um meio turbulento, a difração sofrida pelos raios ópticos é maior do que em um meio não-turbulento (ANDREWS, 2004). Sendo assim, um acréscimo da seção reta do feixe além daquele previsto pela atenuação geométrica (decorrente da difração) é observado. Como

efeito instantâneo desse espalhamento, é definido o raio do feixe a um curto prazo de exposição, W_{ST} (ANDREWS, 2005):

$$W_{ST} = \begin{cases} W_L \sqrt{1 + 1,33\sigma_R^2 \Lambda^{5/6} \left[1 - 0,66 \left(\frac{\Lambda_0^2}{1 + \Lambda_0^2} \right)^{1/6} \right]}, & \text{(feixe colimado)} \\ W_L \sqrt{1 + 0,35\sigma_R^2 \Lambda^{5/6}}, & \text{(feixe focado)} \end{cases} \quad \text{EQ. 2.42}$$

onde W_L é o raio do feixe limitado pela difração, dado pela EQ. 2.12, Λ_0 e Λ são a razão de Fresnel no plano de transmissão e de recepção, respectivamente (RECOLONS, 2007):

$$\Lambda_0 = \frac{2L}{kW_0^2} \quad , \quad \Lambda = \frac{2L}{kW_L^2} \quad \text{EQ. 2.43}$$

Em um meio turbulento, o vagueamento e o espalhamento são fenômenos que ocorrem simultaneamente em um feixe que se propaga neste meio (DIOS, 2004). Portanto, é definido um raio a longo prazo de exposição do feixe resultante da ação destes fenômenos W_{LT} (RECOLONS, 2007):

$$W_{LT} = W_0 \left[1 + 1,33\sigma_R^2 \left(\frac{2L}{kW_0^2} \right)^{5/6} \right]^{1/2} \quad \text{EQ. 2.44}$$

A interpretação física do raio do feixe a longo prazo é melhor observada através da FIG. 2.15, que mostra o raio W_{LT} como uma superposição dos raios W_{ST} causados pelo vagueamento do feixe.

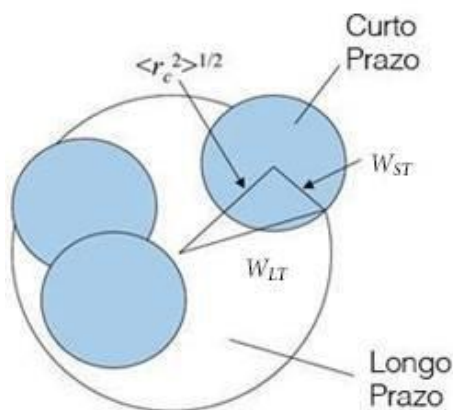


FIG. 2.15 Relação trigonométrica entre o espalhamento e o vagueamento do feixe causados pela turbulência atmosférica (ANDREWS, 2004).

A partir da análise da FIG. 2.15, é possível escrever a relação entre os fenômenos descritos (RECOLONS, 2007):

$$\langle r_c^2 \rangle = W_{LT}^2 - W_{ST}^2 \quad \text{EQ. 2.45}$$

2.3.3.3 CINTILAÇÃO

O terceiro efeito causado pela turbulência em um feixe óptico e, o principal deles, é a Cintilação. Cintilação refere-se à variação temporal ou espacial sofrida pela irradiância de uma onda óptica que é causada por flutuações no índice de refração ao longo do caminho óptico. A cintilação gera interferência aleatória no sinal, podendo causar tanto a perda quanto a saturação do mesmo. É o efeito da turbulência que mais afeta o funcionamento de um sistema FSO, se intensificando nas proximidades das superfícies (DIOS, 2004). A miragem, observada em ambientes desérticos, é um exemplo de cintilação. Na FIG. 2.16, observa-se um exemplo de miragem, um fenômeno muito comum observado em regiões quentes e superfícies aquecidas pelo sol, devido à cintilação.



FIG. 2.16 Efeito da miragem devido à cintilação.

A cintilação é normalmente medida pela variância normalizada da irradiância I (DIOS, 2004):

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad \text{EQ. 2.46}$$

O valor do índice de cintilação é proporcional à variância de Rytov, σ_R^2 . Com base na teoria de Rytov para meios turbulentos, uma relação entre o parâmetro C_n^2 e a variância relativa da intensidade óptica de um feixe pode ser concebida (ANDREWS, 2004). Portanto, o índice de cintilação pode ser definido como:

$$\sigma_I^2 = 23,17 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} = 18,84 \sigma_R^2 \quad \text{EQ. 2.47}$$

no qual k é o número de onda. Por tratar-se de um fenômeno que afeta a irradiância de um feixe de modo aleatório, geralmente opta-se por uma abordagem probabilística para a sua análise em um determinado meio de propagação. Neste trabalho, a aproximação de Rytov (DORDOVA, 2010) foi utilizada para o cálculo da atenuação devido à cintilação, por tratar-se de um modelo analítico. Este modelo diz que a média de atenuação em um feixe óptico relacionada à cintilação é dada por $2\sigma_I$ (dB), ou seja:

$$\alpha_{cint} = 2\sqrt{23,17 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}} \quad \text{EQ. 2.48}$$

2.3.3.4 ALARGAMENTO TEMPORAL DO PULSO DEVIDO À TURBULÊNCIA

Ao propagar-se em um meio turbulento, o pulso óptico sofre um alargamento temporal. As principais causas são o processo de espalhamento do meio produzido pelos múltiplos percursos e o vagueamento do pulso, que é um fator mais impactante do que o espalhamento do pulso em um regime de turbulência de baixa flutuação (YOUNG,1998).

O valor da irradiância em um ponto do feixe na presença de turbulência atmosférica é dado por (YOUNG,1998):

$$I(r, t, z) = \frac{T_0}{T} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp\left[-\frac{2(t-z/c)^2}{T^2}\right] \quad \text{EQ. 2.49}$$

onde T_0 é a largura inicial do pulso óptico transmitido, c é a velocidade da luz no vácuo, T é a largura do pulso no plano do receptor óptico e é dada por (YOUNG,1998):

$$T = \sqrt{T_0^2 + 8a_1} \quad \text{EQ. 2.50}$$

onde a_1 depende do tamanho da escala externa da turbulência L_0 em um meio, e é dado por (YOUNG,1998):

$$a_1 = \frac{0,3908C_n^2 z L_0^{5/3}}{c^2} \quad \text{EQ. 2.51}$$

no qual z é a posição no espaço livre e $c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo.

2.3.4 ATENUAÇÃO TOTAL DO FEIXE EM UM ENLACE FSO

A atenuação total do feixe óptico em um enlace FSO, em dB, é calculada através de (BLOOM, 2003):

$$\alpha_{TOTAL} = -10 \log\left(\frac{P_R}{P_S}\right), \quad \frac{P_R}{P_S} = \alpha_{geom} \cdot 10^{-(\alpha_{atm} \cdot L + \alpha_T + \alpha_R + \alpha_{cint})/10} \quad \text{EQ. 2.52}$$

onde P_R é a potência detectada no receptor, P_S é a potência transmitida, α_{geom} é a atenuação geométrica resultante, α_{atm} é a atenuação atmosférica presente no meio de propagação, α_T e α_R são, respectivamente, as perdas de inserção do transmissor e do receptor, devido às interfaces fibra-telescópio e eficiências de acoplamento, e α_{cint} é a atenuação que é causada pela cintilação. As atenuações causadas pelo vagueamento e o espalhamento do feixe devido à turbulência estão inclusas no termo da atenuação geométrica α_{geom} .

3. MODELAGEM DO ENLACE FSO

Neste capítulo serão explicados os métodos que foram utilizados nesta dissertação para a implementação da fundamentação teórica, fornecida no capítulo 2, na modelagem e simulação dos enlaces FSO.

As modelagens foram implementadas no programa OptiSystem da empresa Optiwave Corporation Inc. O objetivo das simulações realizadas foi testar o desempenho do enlace FSO ao variar os valores de diversos parâmetros do enlace, para então avaliar o seu desempenho através do valor da *BER* fornecido pelo componente “*BER analyzer*”, do referido programa, no caso do sistema simples. No sistema OCDMA, um algoritmo desenvolvido por (CARNEIRO, 2013) foi utilizado para realizar o cálculo da *BER* em cada simulação.

Contudo, o componente do programa OptiSystem que simula o meio físico de um enlace FSO é limitado à modelagem dos efeitos da atenuação atmosférica e da atenuação geométrica causada pela divergência do feixe e, portanto, não simula os efeitos da turbulência. Por este motivo, optou-se por substituir o componente FSO fornecido pelo programa OptiSystem por um bloco do programa MATLAB, onde as equações para modelagem do meio turbulento do Capítulo 2 foram inseridas em forma de código.

3.1 COMPONENTE PARA SIMULAÇÃO DO MEIO DE PROPAGAÇÃO

Como foi dito anteriormente, este componente foi confeccionado com o propósito de simular todas as condições atmosféricas que acontecem no canal óptico. Para isto, o bloco do programa MATLAB recebe as informações sobre os parâmetros que o caracteriza direto do programa OptiSystem. Após definidos os parâmetros que serão lidos pelo bloco, a atenuação resultante, que é causada pelo meio de propagação, é adicionada ao orçamento de potência do enlace. Dessa forma, os efeitos da turbulência, ou seja, o vagueamento e o espalhamento do feixe e a cintilação e, também, os possíveis desalinhamentos no canal óptico puderam ser devidamente modelados e analisados no simulador utilizado.

A TAB. 3.1 mostra estes parâmetros, com os seus nomes originais no programa OptiSystem, e os respectivos parâmetros importantes para a modelagem do canal FSO com o qual estes serão relacionados no componente do programa MATLAB.

TAB. 3.1 Parâmetros para a modelagem do canal FSO.

Parâmetro no OptiSystem	Parâmetro FSO
Parameter0	Comprimento do enlace L (m)
Parameter1	Atenuação atmosférica α_{atm} (dB/km)
Parameter2	Atenuação geométrica α_{geom} (dB)
Parameter3	Diâmetro do transmissor (cm)
Parameter4	Diâmetro do receptor (cm)
Parameter5	Comprimento de onda λ (nm)
Parameter6	Translação em x (cm)
Parameter7	Translação em y (cm)
Parameter8	Ângulo de elevação (mrad)
Parameter9	Ângulo de azimute (mrad)
Parameter10	Perdas no transmissor α_T (dB)
Parameter11	Perdas no receptor α_R (dB)
Parameter12	Perdas adicionais α_{add} (dB)
Parameter13	Retardo de propagação (ps/km)
Parameter14	Parâmetro estrutural C_n^2 (em $m^{-2/3}$)

Após a leitura destes parâmetros, a atenuação resultante do canal FSO é calculada pelo bloco do programa MATLAB, e seu valor é transferido novamente para o programa OptiSystem, para que o valor da BER seja calculado e apresentado.

Em todas as simulações feitas no programa, foi considerado um feixe óptico colimado (ou seja, com $F_0 \approx \infty$) e com distribuição uniforme de intensidade.

3.2 SISTEMAS ANALISADOS

Neste trabalho, dois tipos de sistemas FSO foram analisados nas simulações. O primeiro se trata de um sistema básico, composto apenas de um transmissor, um receptor, e o componente do programa MATLAB que simula o canal óptico. O segundo sistema utiliza o método de acesso múltiplo por divisão de código (*Optical Code Division Multiple Access - OCDMA*), uma técnica de multiplexação que permite a utilização do mesmo canal de propagação óptico por múltiplos usuários (AGRAWAL, 2002). Estes sistemas estudados serão descritos a seguir.

3.2.1 SISTEMA BÁSICO

A FIG. 3.1 mostra um diagrama esquemático com os componentes do sistema básico utilizado, onde o meio espaço livre é descrito no componente do programa MATLAB.

O transmissor utilizado é um laser de 10 MHz de largura de linha. Sua potência foi variada entre 0, 5, 10 e 15 dBm, e o comprimento de onda empregado foi de $\lambda = 1550$ nm. O laser é modulado opticamente no formato binário tradicional não retorna a zero (NRZ – *non-return-to-zero*) o que gera uma atenuação de 2,7 dB na potência nominal devido à modulação. Isto se deve ao *chirp* e, conseqüente, alargamento gerado na modulação. Além disso, este transmissor também possui 3 dB de perdas de inserção e razão de extinção de 10 dB. O diâmetro de abertura utilizado foi de 10 cm, por ser um tamanho comumente utilizado em aplicações comerciais.

O receptor utilizado é um fotodetector PIN com uma sensibilidade de -31,93 dBm e responsividade de 1 A/W. Assim como o transmissor, ele também possui uma abertura de 10 cm e 3 dB de perdas de inserção.

O sistema opera em uma taxa de bits de $B = 1,25$ Gbps, e envia seqüências de 128 bits de comprimento, com 64 amostras por bit.

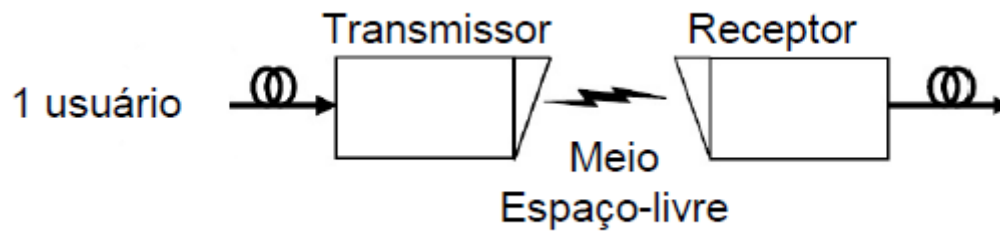


FIG. 3.1 Diagrama esquemático do sistema básico (RODRIGUES, 2012).

Na FIG. 3.2 observa-se o circuito óptico do sistema básico implementado no programa OptiSystem, com os seus devidos parâmetros utilizados para descrever as características do canal óptico no bloco do componente do programa MATLAB, conforme apresentado na Tabela 3.1.

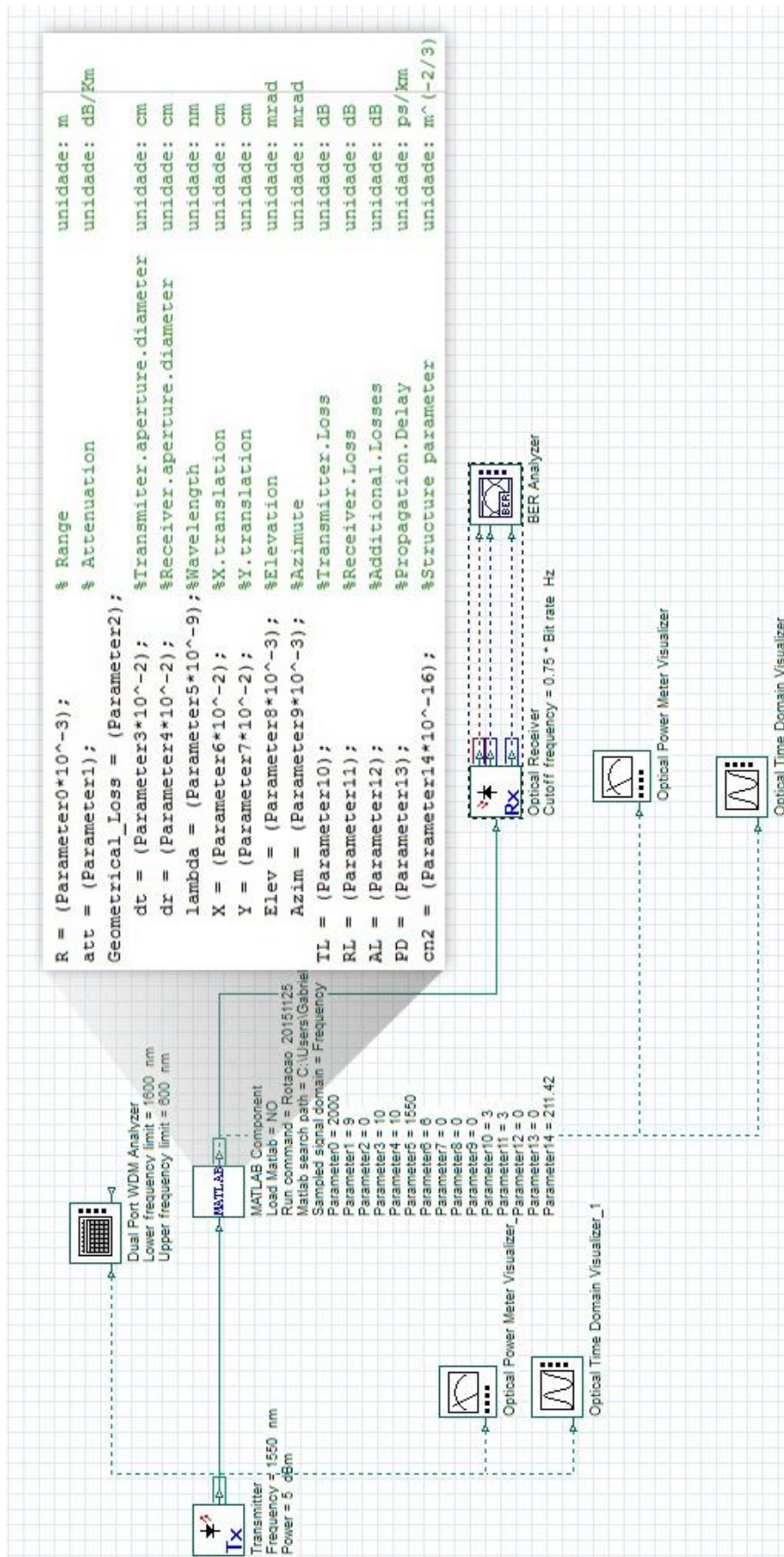


FIG. 3.2 Sistema básico de FSO implementado no programa OptiSystem.

3.2.2 SISTEMA OCDMA 1D

Para o segundo modelo a ser analisado, foi escolhido um sistema que utiliza a técnica de múltiplo acesso por divisão de códigos aplicadas a sistemas ópticos (OCDMA). Esta técnica difere-se das técnicas de multiplexação no tempo e na frequência, como é o caso do TDMA (*time division multiple access*) e FDMA (*frequency division multiple access*), respectivamente. Na tecnologia OCDMA, que é baseada na multiplexação por divisão de código, cada canal de usuário é multiplexado através de códigos (AGRAWAL, 2002). A diferença entre as técnicas de multiplexação citadas pode ser observada na FIG. 3.3, onde as técnicas TDMA e FDMA mostram como a alocação dos canais de usuários é feita no tempo e na frequência, respectivamente, enquanto essa alocação é espalhada pelo espectro através de códigos no método CDMA, representados por quadrados na figura.

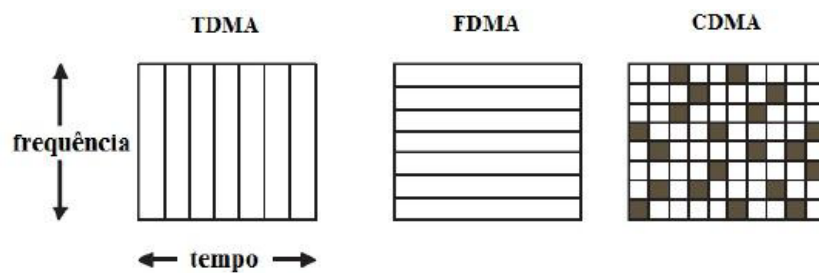


FIG. 3.3 Comparação entre as técnicas de multiplexação TDMA, FDMA e CDMA (TARHUNI, 2007).

Como é possível observar na FIG. 3.1, o sistema básico só é capaz de atender ao tráfego de dados de um único usuário. A vantagem deste segundo sistema é que, através da multiplexação, diversos usuários podem compartilhar um único canal e, com a codificação, a transmissão dos dados é realizada. A FIG. 3.4 mostra um diagrama esquemático simplificado de um sistema FSO que utiliza a técnica de multiplexação OCDMA para 5 usuários, o mesmo número de usuários que foi utilizado nas simulações deste trabalho.

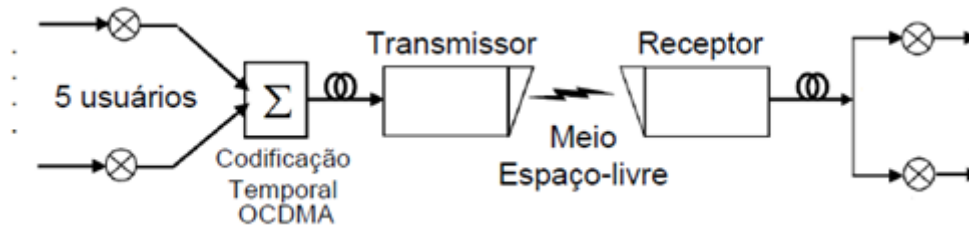


FIG. 3.4 Diagrama esquemático simplificado do enlace FSO com sistema OCDMA 1D (RODRIGUES, 2012).

Como pode ser observado na FIG. 3.4, foi utilizado um OCDMA que utiliza apenas códigos temporais na sua multiplexação. Esta codificação é chamada de sequência direta (*direct sequence – DS*), e também de 1D (unidimensional). Estes códigos suportam um número de usuários no canal menor do que com o uso de códigos bidimensionais (2D), que utilizam as técnicas de salto de comprimento de onda e espalhamento temporal (*wavelength-hopping/time-spreading – WH/TS*), mas é a codificação mais pesquisada atualmente em sistemas OCDMA (YIN, 2007). Além disso, a codificação 1D possui maior simplicidade computacional e de implementação e, por este motivo, foi utilizada neste trabalho.

A escolha da utilização do OCDMA neste trabalho também se dá pelo fato de que existem poucos estudos referentes a sistemas FSO com OCDMA para meios turbulentos (RODRIGUES, 2012). Portanto, o estudo realizado neste trabalho visa gerar novos resultados para a melhor compreensão dos fenômenos da turbulência e do desalinhamento frente ao uso desta técnica.

Na FIG. 3.5 o esquema do OCDMA 1D, com todos os elementos que o compõem está ilustrado. Os elementos serão explicados em seguida.

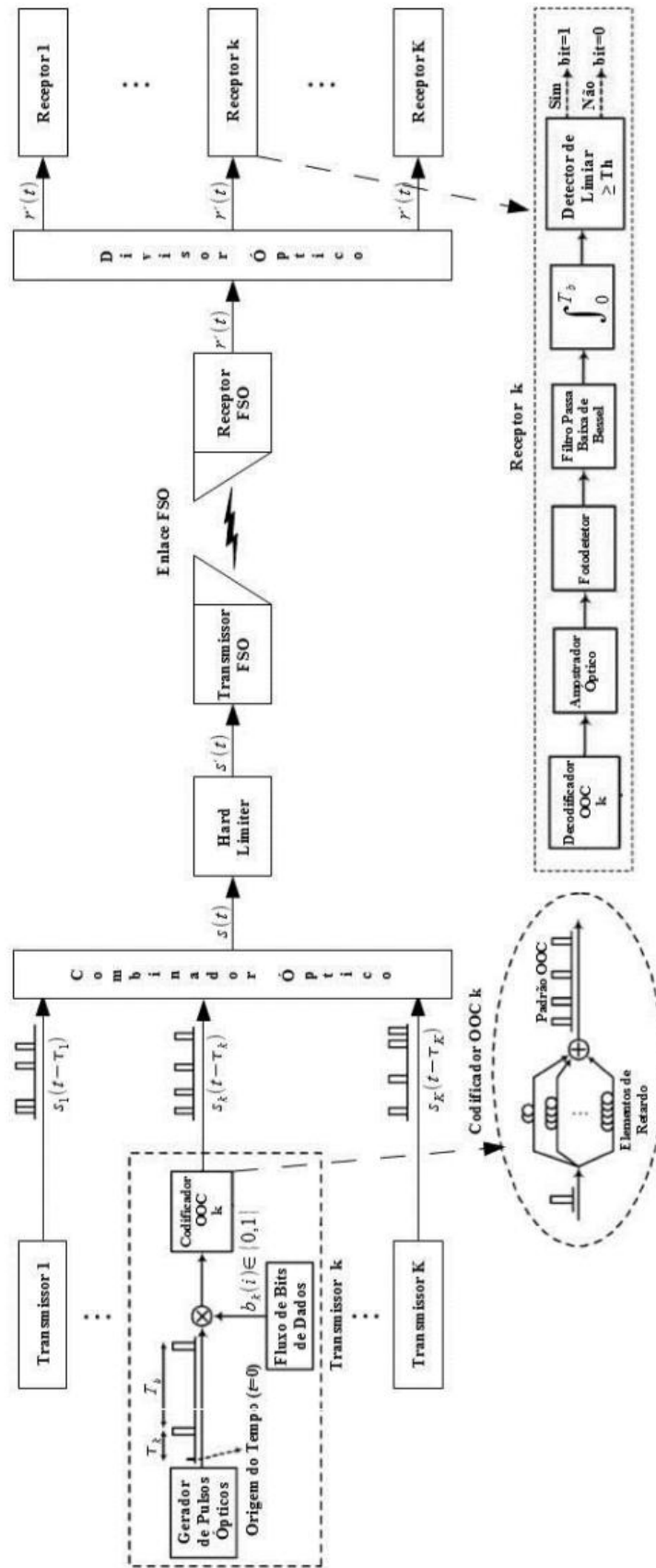


FIG. 3.5 Arquitetura básica adotada para o sistema OCDMA 1D (CARNEIRO, 2013).

Para este sistema, foi escolhida uma taxa de bits de $B = 100$ Mbps, por se tratar de um valor normalmente adotado em muitos sistemas de rede, como aquelas que adotam o padrão *Fast Ethernet* (CARNEIRO, 2013).

A TAB. 3.2 apresenta os valores dos parâmetros de simulação que foram utilizados para este sistema.

TAB. 3.2 Parâmetros de simulação do sistema OCDMA 1D.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Comprimento de Onda do Laser (λ)	1550 nm
Potência do Laser (P_L)	5 dBm
Largura de Linha do Laser ($\Delta\nu$)	1 MHz
Perda de Inserção dos Moduladores (δ_{mod})	1 dB
Razão de Extinção dos Moduladores ($r_{ex,mod}$)	100 dB
Perda de Inserção dos Acopladores (δ_{acopl})	0 dB
Diâmetro de Abertura do Transmissor (d_T)	10 cm
Diâmetro de Abertura do Receptor (d_R)	10 cm
Perda de Inserção do Transmissor (α_T)	3 dB
Perda de Inserção do Receptor (α_R)	3 dB
Taxa de Bits (B)	100 Mbps
Número de Amostras por Bit (N_S)	512
Número de Bits Transmitidos (N_{bits})	1024
Responsividade do Fotodetector (R_f)	1 A/W
Sensibilidade do Receptor (R_S)	- 47,22 dBm

3.2.2.1 GERADOR DE PULSOS ÓPTICOS

O OCDMA temporal usa pulsos ópticos muito curtos, chamados *chips*, para inserir a codificação no domínio do tempo (CARNEIRO, 2013). O gerador de pulsos ópticos é o primeiro subsistema encontrado na estrutura do OCDMA. Sua função é gerar pulsos com a

duração exata do tempo do *chip*, T_c , no início de cada bit. Portanto, ele deve possuir uma frequência de geração de pulsos igual à taxa de transmissão B .

Neste trabalho, optou-se por lasers como fonte de geração dos pulsos, pois apresentam maior potência e menor largura de pulso, o que o torna mais indicado para diferentes aplicações FSO do que o diodo emissor de luz (*Light-Emitting Diode* - LED).

Diferentemente do laser utilizado no sistema básico visto anteriormente, no sistema OCDMA 1D modelado neste trabalho, usa-se um laser de onda contínua (*Continuous Wave* – CW), onde a modulação ocorre externamente. Os moduladores ópticos utilizados na modulação externa são compostos do material LiNbO_3 em uma configuração de interferômetro de Mach-Zehnder (MZ), cuja arquitetura é ilustrada pela FIG. 3.6.

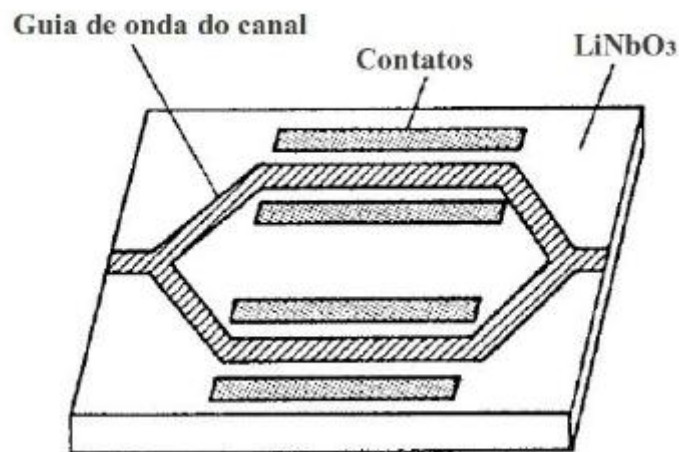


FIG. 3.6 Modulador óptico de LiNbO_3 (AGRAWAL, 2002).

O índice de refração do LiNbO_3 é alterado quando uma tensão é aplicada nos dois braços do dispositivo. Portanto, usando-se o princípio da interferometria, este modulador faz com que a interferência entre os sinais que trafegam em seus ramos seja construtiva, na ausência de tensão externa, ou destrutiva, quando uma tensão externa for aplicada, o que impede a transmissão de luz neste caso (AGRAWAL, 2002).

3.2.2.2 CODIFICADORES E DECODIFICADORES OCDMA

Os codificadores ópticos, observados na FIG. 3.5, são os elementos responsáveis pela inserção dos *chips*. Foi utilizado um codificador baseado em linhas de retardo ópticas, cujo objetivo é codificar pulsos ópticos de picos muito elevados em trens de pulsos de baixa intensidade (CARNEIRO, 2013).

Já o decodificador tem a função de endereçar os chips recebidos para os seus respectivos usuários, através da correlação da intensidade do sinal recebido usando uma rede casada de linhas de retardo.

Os dispositivos de codificação e decodificação presentes no OCDMA 1D são formados por um divisor de potência, um combinador de potência e fibras ópticas com comprimentos diferentes, que são utilizadas como linhas de retardo. Na recepção, estas linhas realizam a decorrelação do sinal no tempo, e o entrega para cada um dos usuários aos quais os sinais originais são destinados.

3.2.2.3 HARD LIMITER

Um *hard-limiter* óptico é um elemento limitador de potência combinado com realimentação óptica para alcançar uma bistabilidade. Sua função é impedir que a combinação de determinados padrões de interferência se tornem muito localizados em uma parte do código (CHEN, 2001), agindo como um flip-flop que bloqueia ou libera a passagem da potência, através da seguinte regra (BRZOZOWSKI, 2001):

$$P_{out,HL} = \begin{cases} P_{down}, & \text{para } P_{in,HL}(t) < P_{th,down} \\ C_1 \cdot P_{in}(t) + C_2, & \text{for } P_{th,down}(t) \leq P_{in}(t) \leq P_{th,up} \\ P_{up}, & \text{para } P_{in}(t) > P_{th,up} \end{cases} \quad \text{EQ. 3.1}$$

onde $C_1 = \frac{P_{up} - P_{down}}{P_{th,up} - P_{th,down}}$, $C_2 = \frac{(P_{down} \cdot P_{th,up}) - (P_{up} \cdot P_{th,down})}{P_{th,up} - P_{th,down}}$, $P_{out,HL}$ é a potência na saída do *hard-limiter*, $P_{in,HL}$ é a potência na entrada do *hard-limiter*, P_{down} é o limite inferior da potência de saída, P_{up} é o limite superior da potência de saída, $P_{th,down}$ é o limite inferior da potência na

entrada e $P_{th,up}$ é o limite superior da potência na entrada. É importante também que o componente seja projetado de modo a garantir que $P_{up} = P_{th,up} \leq 2 \times P_{th,down}$ para seguir a limitação de projeto realista prevista em (BRZOZOWSKI, 2001).

Porém, o *hard-limiter* da EQ. 3.1 não possui um componente que o represente na biblioteca de componentes do programa OptiSystem. Portanto, um bloco do programa MATLAB contendo a propagação deste componente foi confeccionado para que uma aproximação mais realista fosse obtida (CARNEIRO, 2013). Este bloco foi inserido imediatamente antes do canal óptico no circuito modelado. A FIG. 3.7 mostra uma sequência de bits antes e depois de ser transmitida através do componente, quando a potência óptica transmitida pelo laser foi de 5 dBm.

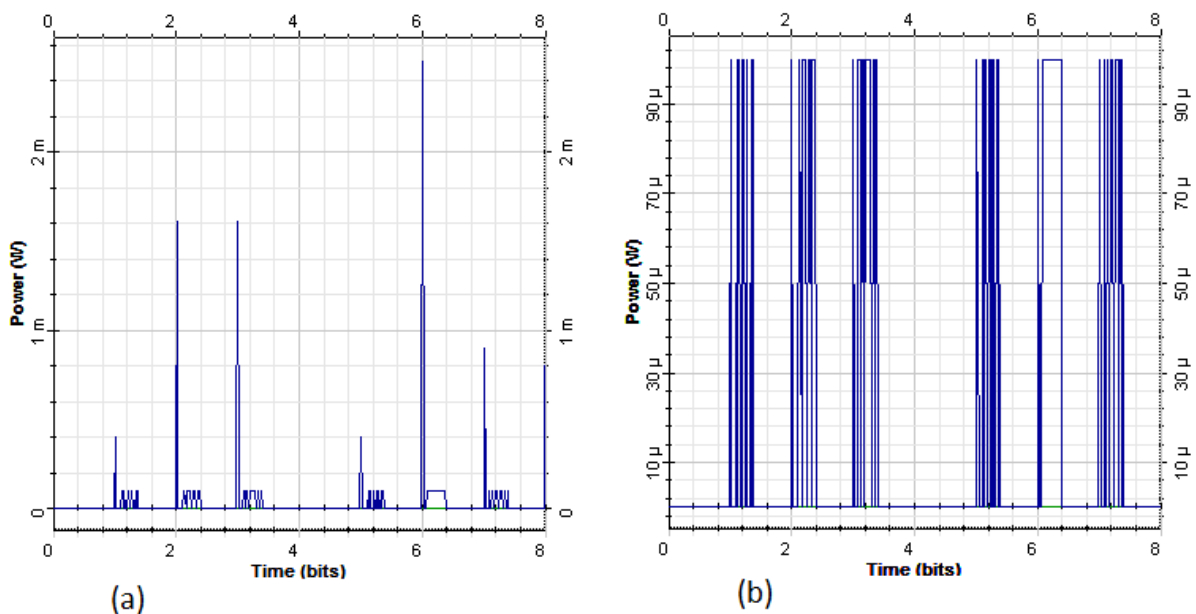


FIG. 3.7 (a) Potência de sequência de bits sem o uso do hard-limiter. (b) Ação do hard-limiter na potência de uma sequência de bits.

Na FIG. 3.7 (a), observa-se a transmissão de bits cujos picos de potência chegam próximos a 3 mW. Já na FIG 3.7 (b), observa-se uma padronização nas potências de saída, com $P_{th,up}$ configurado para 100 μ W devido à ação do *hard-limiter*. Este procedimento facilita a diferenciação entre os *chips* 0 e 1 na leitura realizada pelo sistema, o que faz com que o resultado de BER obtido seja otimizado.

3.2.2.4 ELEMENTOS DOS RECEPTORES

Além dos decodificadores, os outros elementos presentes nos receptores de cada um dos usuários serão descritos nesta seção.

Na recepção, para realizar a correlação dos *chips* que são destinados a um usuário, é utilizada uma rede casada de linhas ópticas de retardo. Desta forma, todos os pulsos dos *chips* referentes a um dado usuário do sistema serão sujeitos a diferentes retardos, para que eles sejam sobrepostos no primeiro *slot* de *chip* do próximo bit.

Este processo de correlação óptica gera efeitos chamados de produtos laterais (CARNEIRO, 2013), que são indesejados para o processo de decorrelação dos *chips*. Quanto maior o número de usuários em um sistema, maior será a amplitude destes produtos laterais, o que causa um aumento na BER do sistema. Portanto, amostradores ópticos foram empregados no sistema OCDMA 1D visando contornar este problema.

Os fotodetectores das simulações correspondem a diodos APD, muito empregados na prática. Estes componentes fornecem a leitura do comprimento de onda, e entregam o sinal para um filtro passa baixa de Bessel, que seleciona a região de interesse no espectro de potência a fim de reduzir o ruído. Após este processo, o sinal passa por um integrador óptico, que é um dispositivo optoeletrônico equivalente a um capacitor que calcula a integral no tempo do sinal de entrada no intervalo de tempo dos bits.

O detector de limiar utilizado nas simulações é o próprio componente analisador de BER do programa OptiSystem.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, os resultados das simulações realizadas em ambos os sistemas propostos no capítulo 3 serão analisados e discutidos. O objetivo principal é a análise do sinal óptico que se propaga pelo meio atmosférico turbulento em cada um dos sistemas, com uma avaliação geral de desempenho destes.

O impacto da influência do canal FSO sobre o desempenho do sistema, considerando diferentes níveis de turbulência e de atenuação atmosférica, além de desalinhamento no enlace será discutido. Em todas as simulações realizadas e apresentadas neste capítulo, feixes ópticos perfeitamente colimados (ou seja, com $F_0 \approx \infty$) foram utilizados.

Também é apresentada uma análise do alargamento do pulso óptico decorrente da ação da turbulência atmosférica. Foram avaliados os resultados para enlaces com diferentes comprimentos de onda, distâncias de propagação e parâmetro estrutural de índice de refração, e o efeito destes parâmetros no alargamento de pulsos ópticos com diferentes larguras temporais.

Para a validação dos resultados obtidos, foram utilizados diferentes artigos da literatura. Como exemplos que podem ser citados, para a variação do raio do feixe a longo prazo foi utilizado para a validação o artigo de ReCOLONS et al. (RECOLONS, 2007), para a atenuação causada pela cintilação, foi usado o artigo de Dordova et al. (DORDOVA, 2010) e para o alargamento temporal do pulso, foi usado o artigo de Young et al. (YOUNG, 1998).

4.1 RESULTADOS PARA O SISTEMA BÁSICO

Primeiramente, optou-se por analisar o enlace FSO composto pelo sistema básico mostrado na FIG. 3.1 em um meio sem turbulência. Nos resultados mostrados na FIG. 4.1, observa-se o quanto da potência inicial que é entregue ao sistema será atenuada durante a propagação do feixe óptico. Neste caso, como a ação da turbulência não está presente, as perdas de potência serão decorrentes da atenuação geométrica devido à difração do feixe luminoso, que fará com que este se alargue de acordo com a distância propagada, e também

da atenuação atmosférica. Esta é representada na FIG. 4.1 por três valores diferentes: 1 dB/km, 6 dB/km e 9 dB/km, que correspondem às condições de tempo claro, chuva fraca e névoa fraca, respectivamente (WILLEBRAND, 2001). Um laser com 5 dBm de potência óptica foi utilizado como o transmissor óptico em quase todas as simulações realizadas, com poucas exceções onde isso será explicitado. Como o resultado mostra, a maior potência detectada, para os casos com enlaces de comprimento zero será de -3,65 dBm devido às perdas de inserção e adicionais no transmissor e no receptor. A curva tracejada da FIG. 4.1 corresponde à sensibilidade do receptor óptico utilizado que, neste caso, é igual a -31,93 dBm.

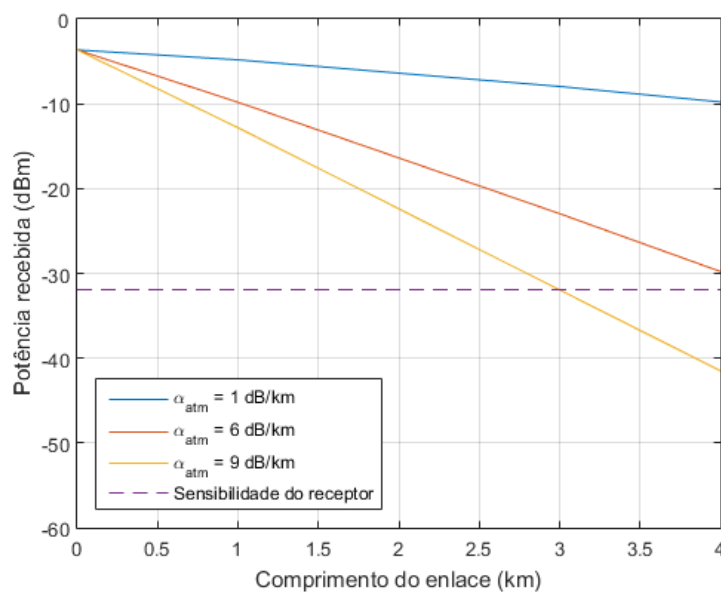


FIG. 4.1 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência.

Na FIG. 4.1 é possível observar diferentes atenuações que o sinal sofre ao se propagar por certa distância em meios com coeficientes de atenuação atmosférica diferentes. Em um meio com tempo claro (ou seja, com atenuação atmosférica de 1 dB/km), enlaces de maiores comprimentos tornam-se viáveis, devido à baixa atenuação atmosférica pela qual o feixe é submetido, além do fato do laser em questão ser perfeitamente colimado. Contudo, em aplicações práticas, coeficientes de atenuação atmosférica mais elevados são comumente obtidos e causam uma maior atenuação ao sinal, como mostra o resultado. Por este motivo, os cálculos de BER mostrados neste capítulo foram realizados para meios com atenuação atmosférica de 9 dB/km, a fim de buscar uma representação das limitações de comprimento

total do enlace condizente com a caracterização de meios reais, onde a atenuação atmosférica torna enlaces de comprimentos mais elevados inviáveis.

Na FIG. 4.2, observa-se o comportamento da BER para a curva referente à névoa fraca ($\alpha_{atm} = 9$ dB/km) na FIG. 4.1. Como era esperado, um aumento na distância do enlace implicará numa maior difração do feixe óptico, além de maiores perdas de potência no feixe que se propaga devido à atenuação atmosférica. Por estes motivos, a BER aumentará conforme aumenta-se o comprimento do enlace, tornando o funcionamento do sistema cada vez mais comprometido. O valor de $BER = 10^{-9}$ é demarcado como uma linha tracejada horizontal em todas as figuras referentes ao resultado de BER neste capítulo, como o valor máximo de BER aceitável para o funcionamento adequado do sistema.

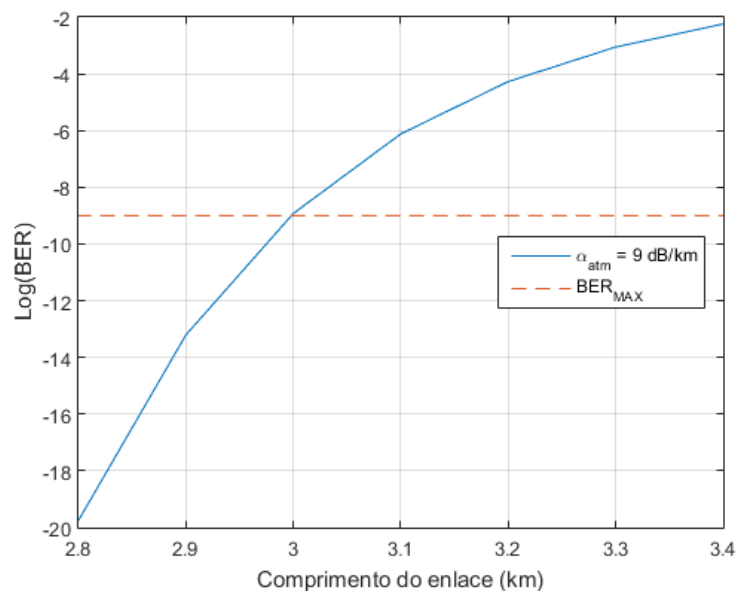


FIG. 4.2 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência.

Para a obtenção dos valores referentes à BER, o componente analisador de BER fornecido pelo programa OptiSystem foi utilizado. O resultado do aumento da BER em relação ao comprimento do enlace evidencia que, para um enlace FSO em um meio sem turbulência e com atenuação atmosférica de 9 dB/km, o comprimento do enlace pode chegar até 3 km de distância, para os parâmetros utilizados nesta simulação.

Uma simulação deste mesmo sistema, também utilizando um laser com potência óptica de 5 dBm, mas agora considerando diferentes valores de desalinhamento lateral no

transmissor, foi realizada. Em meios com coeficientes de atenuação atmosférica mais elevados, a queda de potência se dá de forma mais intensa conforme o feixe se propaga no enlace. Portanto, primeiramente, foram simulados enlaces com diferentes valores de um desalinhamento no eixo x do transmissor em um meio com tempo claro (atenuação atmosférica de 1 dB/km) para que fosse obtido um resultado que permita uma boa visualização do efeito destes desalinhamentos no enlace. Os resultados obtidos são mostrados na FIG. 4.3, onde observa-se a atenuação na potência do sinal decorrente de um possível desalinhamento no sistema.

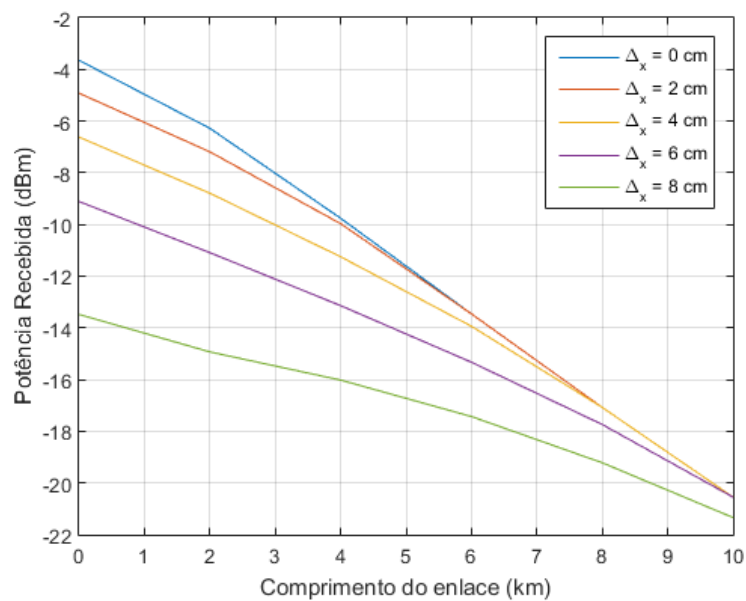


FIG. 4.3 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento.

Ao analisar os resultados mostrados pela FIG. 4.3, observa-se que os enlaces com menores graus de desalinhamento axial no transmissor possuem uma menor atenuação na potência recebida, por possuírem uma menor atenuação geométrica. No entanto, ao aumentar o comprimento do enlace, os resultados obtidos mostram que quanto maior for o desalinhamento do transmissor, menos abrupta será a perda na potência detectada, pois estes casos já registram grandes atenuações. Além disso, ao aumentar o comprimento do enlace, o nível de potência que é recebido tende a valores cada vez mais próximos, mesmo para valores de desalinhamento diferentes. Isto ocorre pois, com o aumento do enlace, a difração faz com que a área do feixe seja alargada e, mesmo possuindo um desalinhamento axial no

transmissor, em longas distâncias o feixe tende a se expandir até que sua área contenha totalmente a área do receptor. Quando isto ocorre, a atenuação geométrica pode ser calculada como se não houvesse desalinhamento entre o transmissor e o receptor.

A mesma análise com diferentes desalinhamentos axiais no transmissor foi realizada para um meio com névoa fraca (atenuação atmosférica de 9 dB/km), como mostra a FIG. 4.4. Neste caso, a queda da potência para os casos com menores desalinhamentos também se dá de forma um pouco mais abrupta do que os casos com maiores desalinhamentos. No entanto, devido a uma atenuação atmosférica mais elevada, o sinal sofre uma atenuação muito maior com o aumento da distância quando comparado com o efeito do desalinhamento e, assim, a atenuação atmosférica domina.

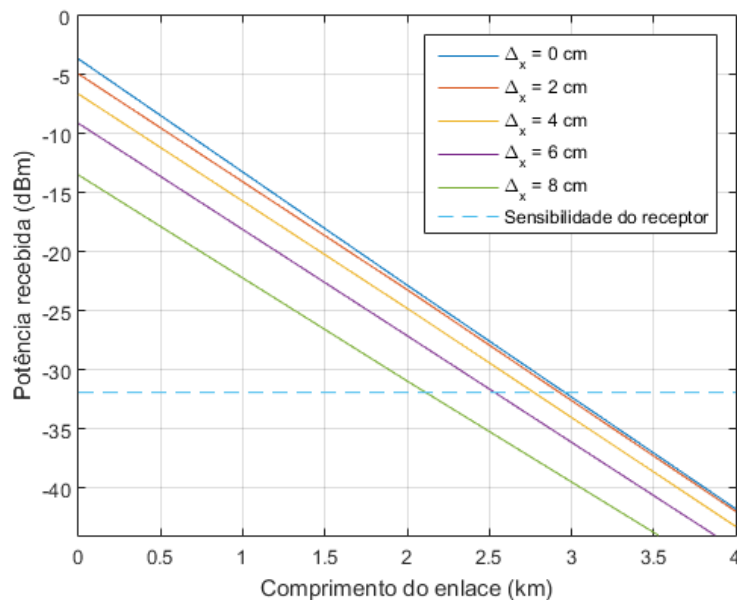


FIG. 4.4 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento.

Para as simulações apresentadas na FIG. 4.4, foram obtidos os valores de BER em relação ao comprimento do enlace, cujos resultados são mostrados na FIG. 4.5. A partir destes resultados, verifica-se que, conforme foi mostrado na FIG. 4.2, a distância máxima possível para o funcionamento do enlace é de 3 km quando o desalinhamento é zero. Já para os casos com desalinhamento de 2 e 4 cm no transmissor, o comprimento máximo do enlace é reduzido para 2,94 e 2,77 km, respectivamente. Esse resultado evidencia que a presença de possíveis desalinhamentos em um enlace FSO pode comprometer gravemente a sua operação, reduzindo drasticamente a distância máxima permitida. Isto corrobora com o fato de que o

apontamento entre o transmissor e o receptor é um elemento crítico para manter o funcionamento apropriado do sistema.

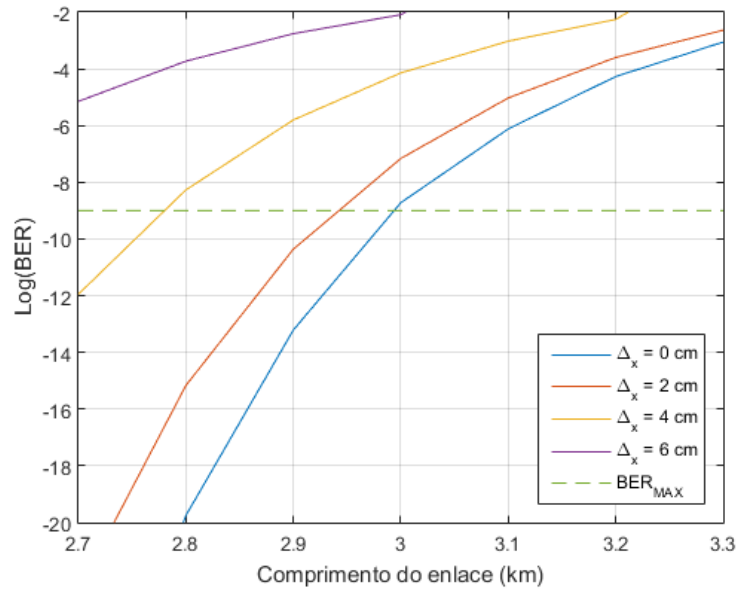


FIG. 4.5 Variação de BER em relação ao comprimento do enlace para diferentes níveis de desalinhamento.

Em seguida, foram realizadas simulações de enlaces com um desalinhamento simultâneo de 3 cm nos eixos x e y , como mostra a FIG. 4.6. Essa variação nos dois eixos corresponde a uma variação radial resultante na direção nordeste igual a 4,24 cm. Este desalinhamento faz com que a maior potência detectada seja de -6,87 dBm, menor do que os -3,65 dBm registrados na FIG. 4.1, quando o comprimento do enlace é zero.

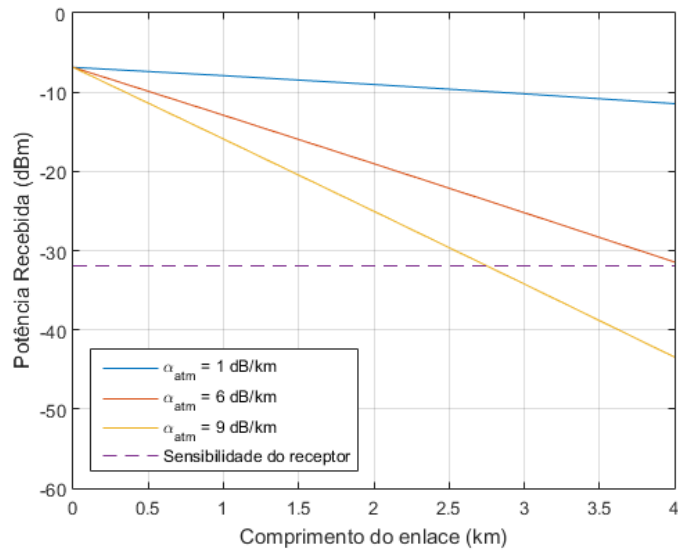


FIG. 4.6 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y .

Os efeitos da divergência no feixe luminoso fazem com que o seu sinal seja atenuado conforme o comprimento do enlace aumenta, sendo esta atenuação cada vez mais acentuada conforme o coeficiente de atenuação atmosférica aumenta. Para o caso de $\alpha_{atm} = 9$ dB/km, foi obtido o resultado de variação da BER em função do comprimento do enlace, mostrado na FIG. 4.7, onde percebe-se que um desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y , simultaneamente, faz com que o comprimento máximo permitido para o funcionamento do enlace seja de 2,76 km, ou seja, 240 metros a menos do que a distância máxima que é permitida para um enlace com a mesma atenuação atmosférica, mas sem desalinhamentos nos eixos do transmissor.

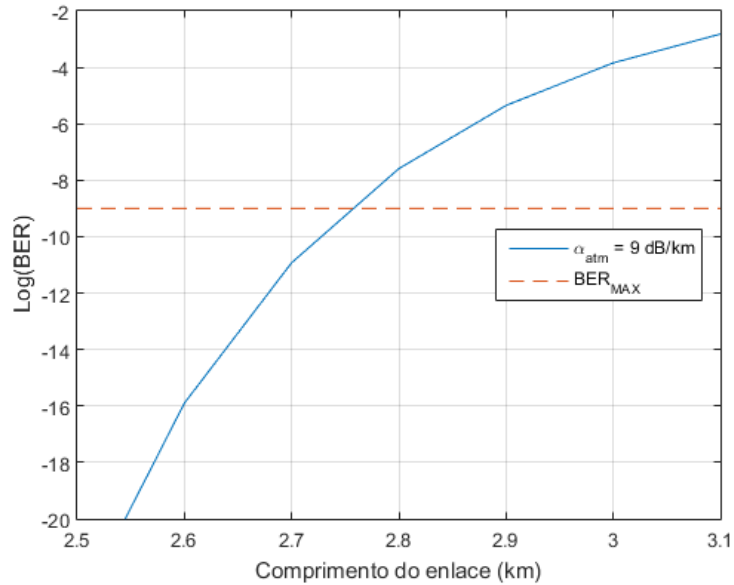


FIG. 4.7 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y .

Em uma outra simulação, também com um laser com potência óptica de 5 dBm, foi testada a variação da potência recebida em relação ao comprimento do enlace quando há uma variação angular no apontamento do transmissor. Por se tratar de um feixe perfeitamente colimado, comprimentos de enlaces maiores do que os usados em feixes divergentes são possíveis. No entanto, para grandes distâncias, uma minúscula variação angular é capaz de gerar um grande desalinhamento no feixe. Portanto, foram simulados enlaces com uma variação de 0,05 mrad no ângulo de azimute, como pode ser observado na FIG 4.8.

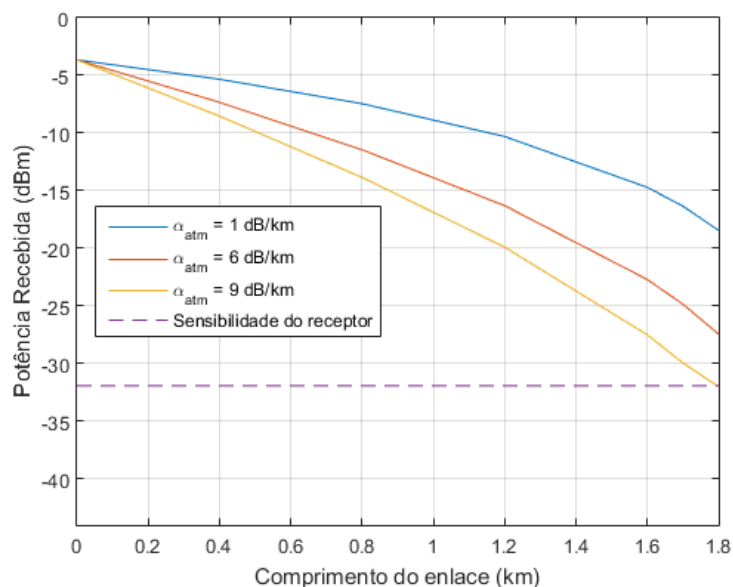


FIG. 4.8 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute.

Uma variação angular mínima pode comprometer muito mais o funcionamento do enlace do que uma variação axial. A FIG. 4.8 mostra o comportamento das curvas de potência recebida em relação ao comprimento do enlace para uma variação de 0,05 mrad no ângulo de azimute. Quanto maior o enlace, maior será o impacto da atenuação devido à variação angular, o que poderá inviabilizar o estabelecimento de enlaces de longo alcance.

Na FIG. 4.9, o resultado de variação de BER para esta simulação é mostrado. Neste resultado, é possível observar que a piora do valor da BER se dá de forma mais abrupta quando há uma variação angular no transmissor, em comparação com os casos de desalinhamento axial. Nesta figura, observa-se que no intervalo entre 1,75 e 1,8 km, o valor da BER variou de aproximadamente 10^{-12} a quase 10^{-6} , o que mostra os efeitos de uma pequena variação angular para uma diferença de comprimentos de enlace relativamente curta. A FIG 4.9 também mostra que, para este valor de variação do azimute, o comprimento máximo do enlace limita-se a 1,77 km.

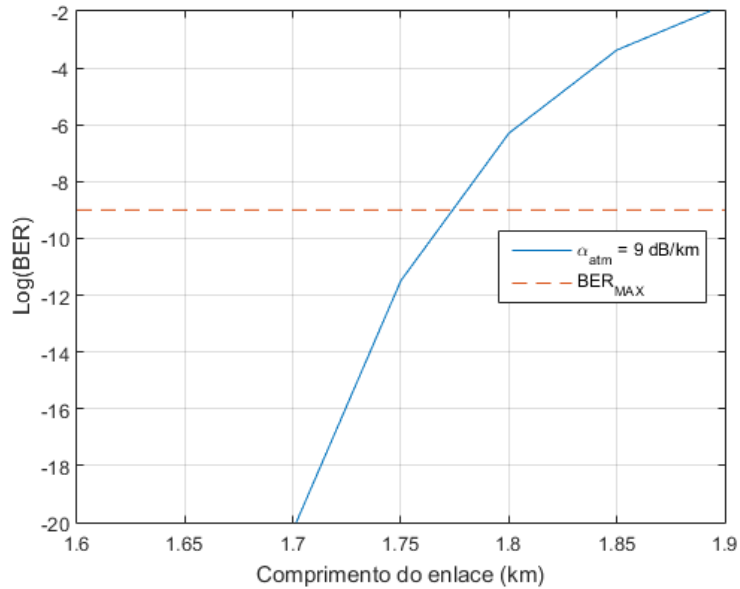


FIG. 4.9 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute.

Este enlace também foi simulado contendo, além da variação angular de 0,05 mrad no azimute, um deslocamento de 1 cm nos eixos x e y . O resultado é mostrado na FIG. 4.10, onde nota-se um comportamento das curvas de potência recebida similar aos da FIG. 4.8, porém, com uma atenuação resultante dos desalinhamentos ainda maior.

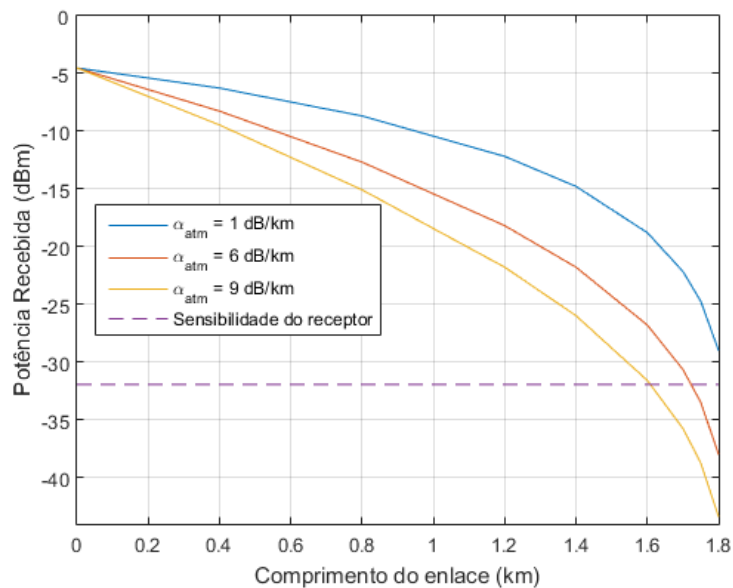


FIG. 4.10 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y .

O resultado de BER para esta simulação é apresentado na FIG. 4.11, onde é possível observar que esta configuração de desalinhamentos no transmissor provoca uma redução ainda maior no comprimento máximo do enlace, sendo este de, aproximadamente, 1,61 km. É importante ressaltar que, após diversas simulações, foi observado que, dada uma variação no eixo x simétrica a uma variação no eixo y , como foi o caso abordado nesta simulação, acarretará na mesma atenuação geométrica resultante para o feixe no caso de variação angular no azimute ou na elevação.

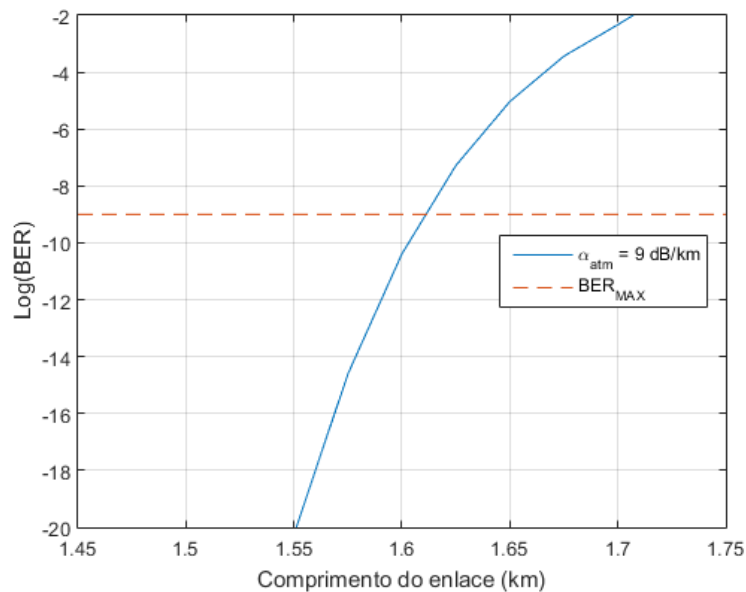


FIG. 4.11 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y .

Em seguida, foram adicionados aos enlaces simulados os efeitos decorrentes da turbulência atmosférica. Os efeitos de espalhamento do feixe e de vagueamento do feixe, aplicados simultaneamente, resultam num aumento efetivo da área do feixe no plano do receptor (ANDREWS, 2005), e contribuem, dessa forma, a um aumento na atenuação geométrica total. Já o efeito da cintilação age diretamente na intensidade do feixe óptico. Portanto, através da teoria mostrada no capítulo 2, um valor médio da atenuação causado pela cintilação pode ser estimado e adicionado na simulação do enlace. A variação da atenuação devido à cintilação, para o comprimento de onda $\lambda = 1550$ nm, com o aumento do comprimento do enlace é ilustrada na FIG. 4.12. Considerando-se um meio turbulento, três

valores diferentes de C_n^2 foram utilizados: turbulência fraca: $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, turbulência média: $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ e turbulência forte: $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$.

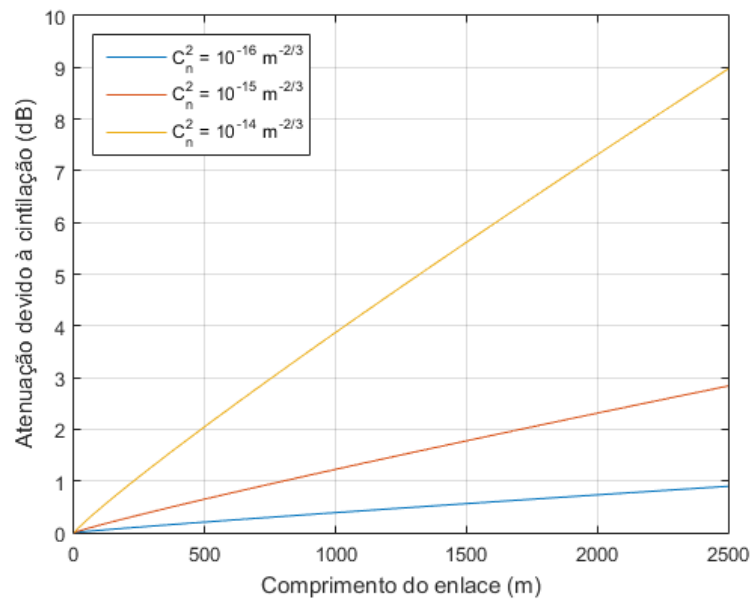


FIG. 4.12 Atenuação causada pela cintilação em relação ao comprimento do enlace.

Um enlace com $\alpha_{atm} = 9 \text{ dB/km}$ e, primeiramente, sem desalinhamento, foi analisado, como mostra a FIG. 4.13. Nota-se que devido à turbulência, a potência recebida em 4 km é menor que a potência recebida no caso sem turbulência (FIG. 4.1) para qualquer valor de C_n^2 .

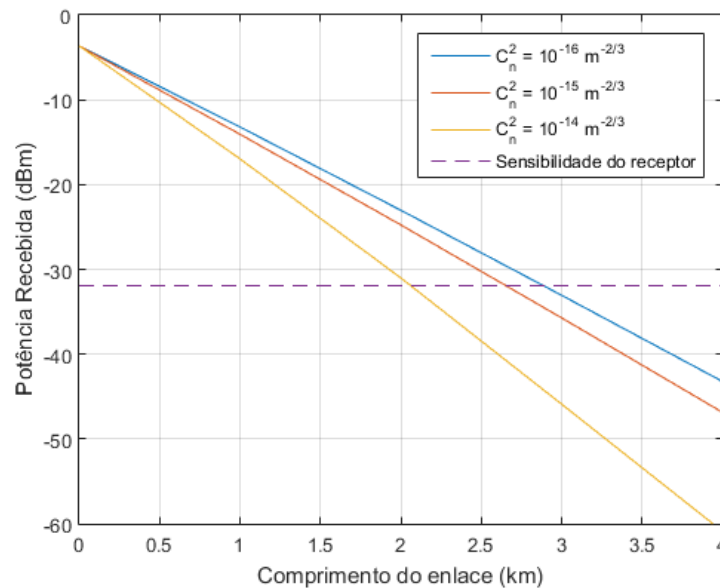


FIG. 4.13 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio turbulento.

Ao considerar na simulação o meio turbulento, significa que também estão influenciando nestes resultados os efeitos de vagueamento e espalhamento do feixe, além da cintilação. Em outras palavras, fontes de atenuação adicionais estão sendo consideradas. Para avaliar os resultados das simulações que consideram a turbulência atmosférica, é importante ressaltar que a sua intensidade é medida pela variância de Rytov, cujo valor depende não só do C_n^2 , mas também da distância de propagação. Por este motivo, o aumento no comprimento do enlace contribui progressivamente para os efeitos da turbulência sobre o feixe.

O resultado da variação da BER com a distância do enlace para um meio com $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ é apresentado na FIG 4.14, onde observa-se que um meio com as características simuladas permite um enlace de até 2,66 km. Neste caso, obteve-se uma penalidade de 3,79 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 3 km no meio não turbulento.

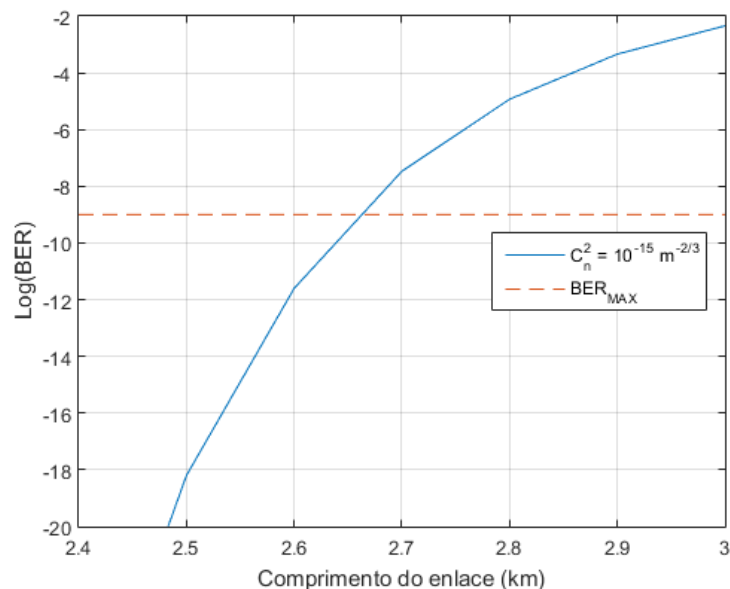


FIG. 4.14 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio turbulento.

Em uma outra abordagem para a análise da propagação do sinal em meio turbulento, foi considerado um enlace óptico com o comprimento fixo $L = 1 \text{ km}$, e uma potência de 0 dBm no laser transmissor. Desta forma, foram obtidos resultados da potência que é entregue ao receptor, para cada um dos três níveis de atenuação atmosférica considerados anteriormente, porém, desta vez, dado em função da variância de Rytov, ou seja, da turbulência.

O resultado obtido, apresentado na FIG. 4.15, mostra que quanto maior for o nível de turbulência, mais atenuado será o sinal, dificultando assim o funcionamento do enlace FSO.

O resultado também mostra que com o aumento da atenuação atmosférica, maior é a atenuação do feixe óptico, estando, portanto, de acordo com a teoria e com os resultados obtidos nas simulações anteriores.

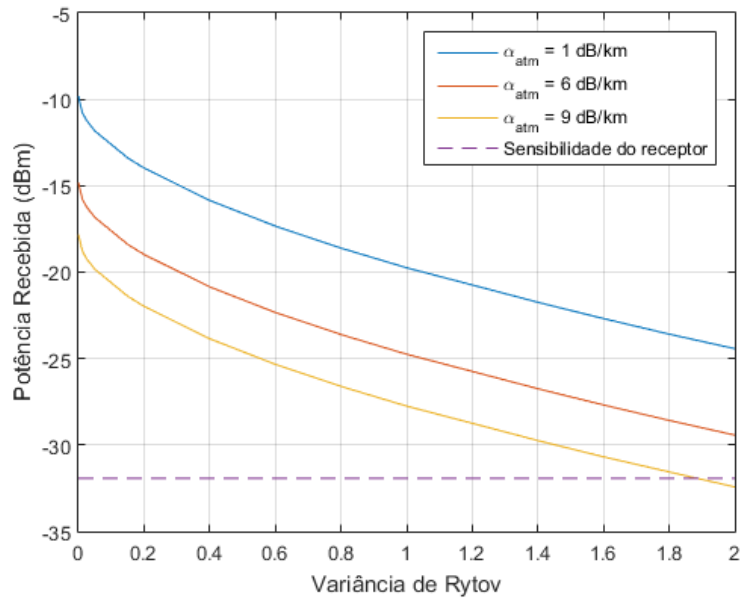


FIG. 4.15 Potência recebida em função da variância de Rytov.

Na Fig. 4.16, a simulação de um enlace de 1 km em um meio com coeficiente de atenuação atmosférica de 14 dB/km, referente a um meio atmosférico com névoa moderada, foi realizada. Neste caso, foi calculado o nível de potência recebida de acordo com a potência transmitida para três níveis de turbulência diferentes: fraco, $\sigma_R^2 = 0,05$; moderado, $\sigma_R^2 = 0,5$ e forte, $\sigma_R^2 = 1,5$. Optou-se pela variância de Rytov, por ser mais fiel na caracterização da turbulência para um dado comprimento do enlace pois, além do parâmetro C_n^2 , o seu valor também é dependente da distância propagada e do comprimento de onda empregado.

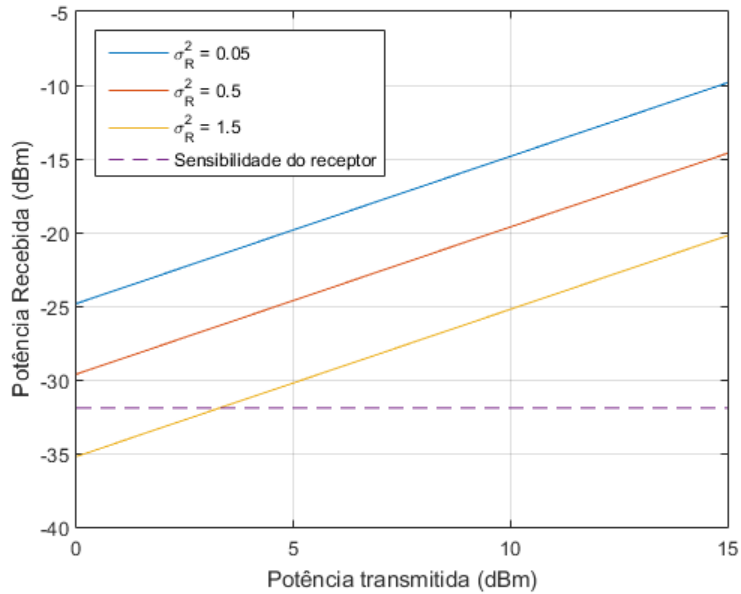


FIG. 4.16 Potência recebida de acordo com a potência transmitida em meio turbulento.

O resultado mostrado na FIG. 4.16 reforça a ideia de que um nível de turbulência mais alto causará uma maior atenuação no sinal do enlace FSO, onde, a potência recebida variou de -24,8 dBm no caso de turbulência fraca até -35,2 dBm no caso de turbulência forte para uma potência transmitida igual a 0 dBm.

Utilizando-se $P_S = 5$ dBm, uma análise da atenuação no sinal devido ao desalinhamento presente no transmissor foi realizada. Desta vez, foi considerado além da atenuação atmosférica de 9 dB/km, também um meio com um parâmetro estrutural do índice de refração $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, ou seja, turbulência moderada.

O resultado presente na FIG.4.17 mostrou uma atenuação total no enlace maior do que no caso de um meio não turbulento, ilustrado na FIG. 4.4. Este resultado comprova as perdas adicionais decorrentes do meio turbulento que agem no sinal óptico que se propaga. Para o caso com um deslocamento axial de 4 cm, obteve-se uma penalidade de 3,17 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 2,77 km conseguida no meio não turbulento. A FIG. 4.17 também mostra que os efeitos do desalinhamento axial são mais perceptíveis em enlaces mais curtos. Mas, assim como foi mostrado na FIG. 4.3, os efeitos de um desalinhamento axial tornam-se cada vez menos impactantes para a atenuação geométrica conforme a distância do enlace aumenta.

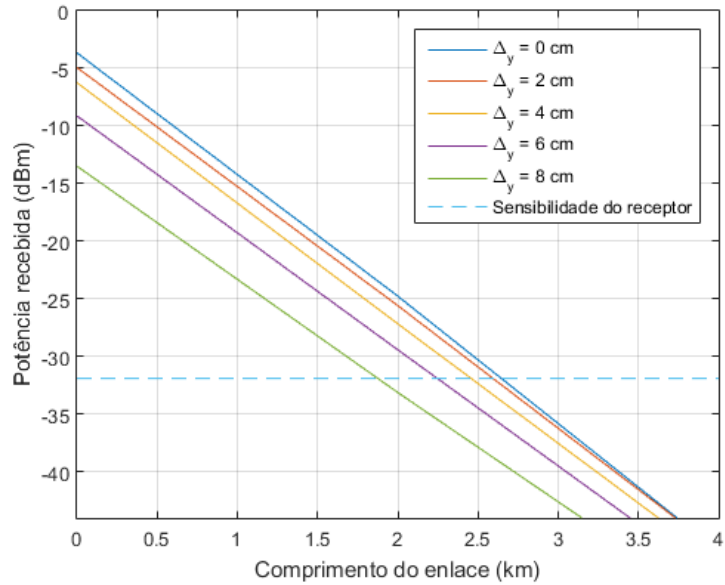


FIG. 4.17 Potência recebida em função do comprimento do enlace em meio turbulento e com desalinhamento.

Para a mesma simulação da FIG. 4.17, foi obtido o resultado para a variação da BER em relação ao aumento da distância, que é mostrado na FIG. 4.18. O resultado mostra curvas de comportamento similar ao apresentado na FIG. 4.5. Porém, a presença da turbulência resultará numa atenuação ainda maior do sinal, limitando ainda mais o comprimento máximo do enlace.

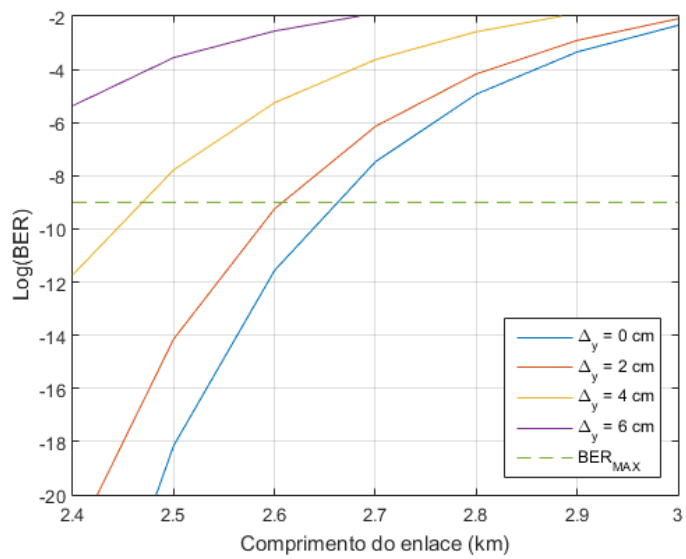


FIG. 4.18 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio turbulento e com deslocamento.

Uma nova simulação foi realizada com $P_S = 0$ dBm em um enlace de 2 km, afim de verificar a dependência da potência na recepção devido a um possível desalinhamento em um meio com turbulência moderada, $\sigma_R^2 = 0,5$, como mostra a FIG. 4.19. A simulação foi realizada, novamente, para três coeficientes de atenuação atmosférica diferentes.

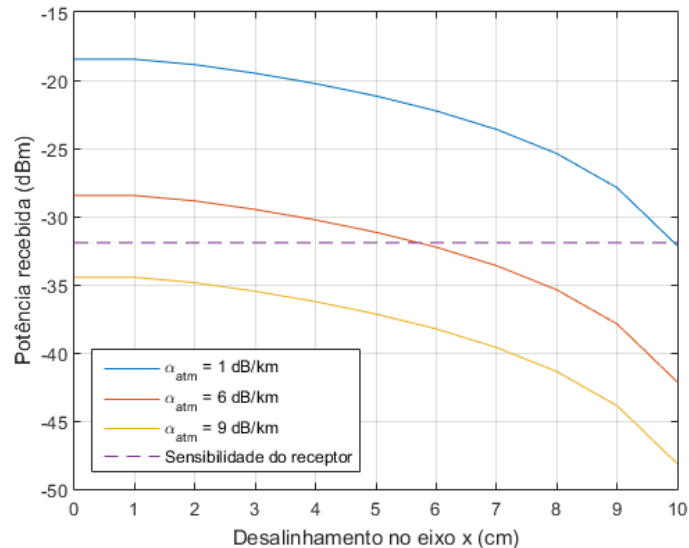


FIG. 4.19 Potência recebida em função do deslocamento axial no receptor.

Neste caso, o feixe possuirá um diâmetro efetivo de 12,12 cm no plano de recepção, devido ao alargamento e ao vagueamento do feixe, sendo maior do que o diâmetro do receptor. Assim, é possível observar que a potência recebida permanece constante do ponto de alinhamento entre transmissor e receptor, em 0 cm, até um deslocamento axial de 1,06 cm, onde a razão entre as áreas do feixe e do receptor começa a diminuir e, por isso, a atenuação geométrica cresce consideravelmente, reduzindo a potência óptica detectada na recepção.

Novamente utilizando um laser com potência óptica de 5 dBm, uma simulação como a observada na FIG. 4.13 foi realizada, mas agora considerando um deslocamento de 3 cm nos eixos x e y . O resultado desta simulação é mostrado na FIG. 4.20, onde o comportamento da atenuação com o aumento da distância é similar àquele observado na FIG. 4.13. Porém, devido ao desalinhamento axial, a potência máxima observada em $L = 0$ km, que na simulação anterior era de $-5,65$ dBm, cai para $-6,87$ dBm, e a potência recebida mantém-se menor para todas as distâncias consideradas, como pode ser observado na FIG. 4.20.

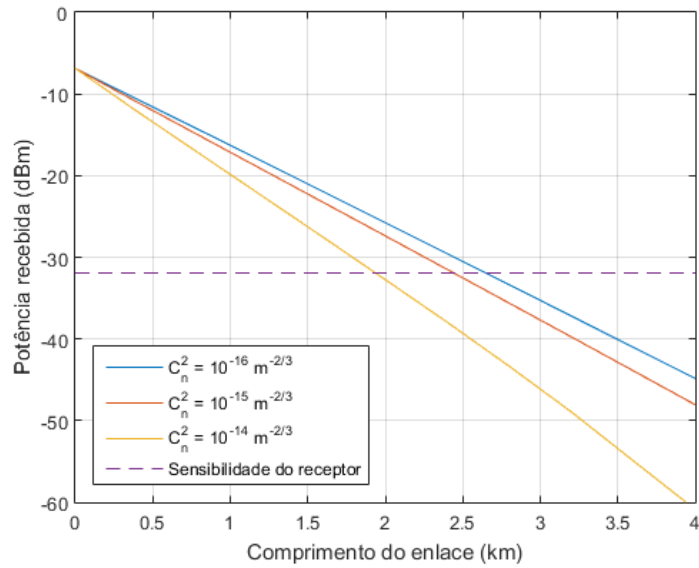


FIG. 4.20 Potência recebida em função do comprimento do enlace em meio turbulento e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y .

Para o caso simulado com $\alpha_{atm} = 9 \text{ dB/km}$ e $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, a BER em relação ao comprimento do enlace, apresentada na FIG. 4.21 mostra que, com um desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y , a distância máxima para o enlace será de 2,45 km, menor 310 m quando comparado ao caso sem turbulência da FIG. 4.7. Neste caso, obteve-se uma penalidade de 3,07 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 2,76 km no meio não turbulento.

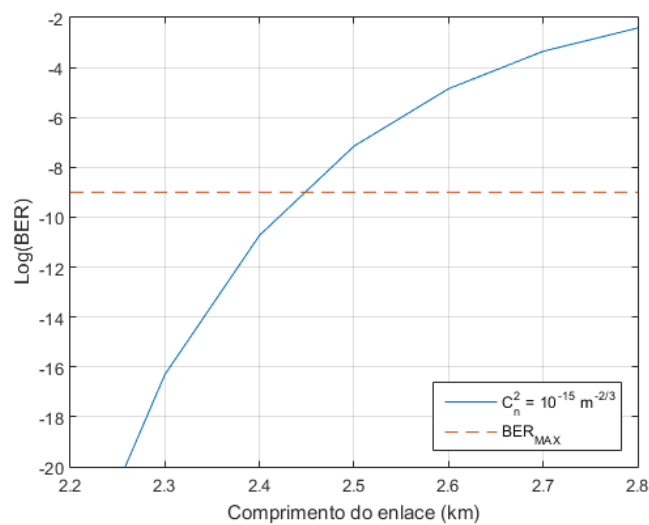


FIG. 4.21 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y .

Foi realizada uma simulação para analisar a influência de uma possível variação angular no transmissor. Para isto, foi adicionada uma variação de 0,05 mrad no ângulo de elevação do transmissor óptico para os três valores diferentes de C_n^2 observados na FIG. 4.22, utilizando-se um laser com potência óptica de 5 dBm em um meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km.

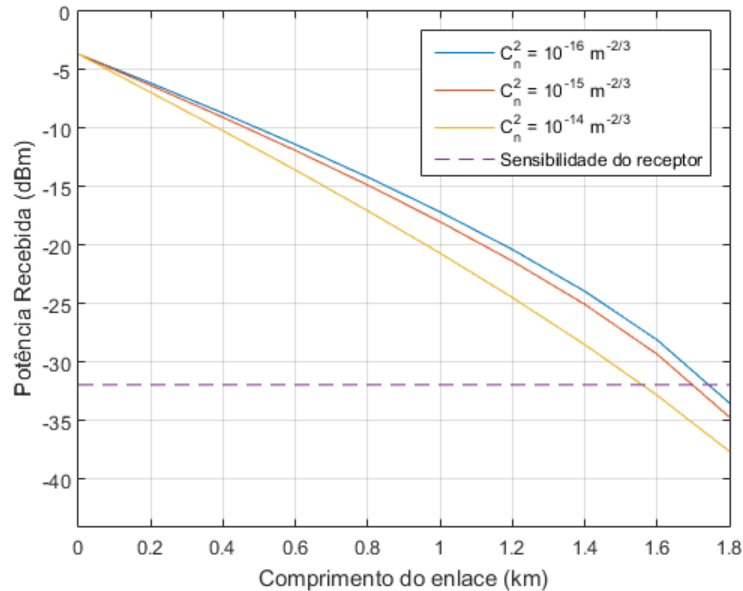


FIG. 4.22 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação.

Nos resultados mostrados na FIG. 4.22, ao analisar o comportamento das curvas obtidas, nota-se que uma variação angular no transmissor não terá grande impacto para enlaces muito curtos. Porém, com um aumento da distância do enlace, esta mesma variação angular torna-se um elemento causador importante da atenuação geométrica em um enlace FSO num meio turbulento.

O resultado de variação de BER em relação ao comprimento do enlace para esta simulação considerando um meio com $C_n^2 = 10^{-15} m^{-2/3}$ é mostrado na FIG 4.23, onde nota-se que o comprimento máximo para este enlace será de 1,71 km, mostrando o impacto que um desalinhamento angular no transmissor pode ter na viabilidade do enlace em um sistema FSO. Neste caso, foi obtida uma penalidade de 1,84 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 1,77 km no meio não turbulento.

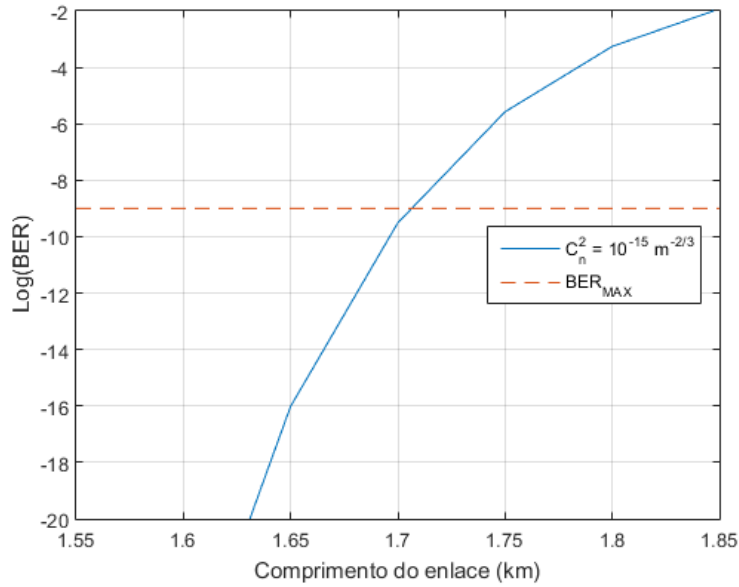


FIG. 4.23 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação.

Às simulações anteriores que consideram uma variação no ângulo de elevação de 0,05 mrad, foram adicionados deslocamentos de 1 cm nos eixos x e y , simultaneamente. Os resultados obtidos são mostrados na FIG. 4.24, onde também foi utilizado um laser com potência óptica de 5 dBm em um meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km.

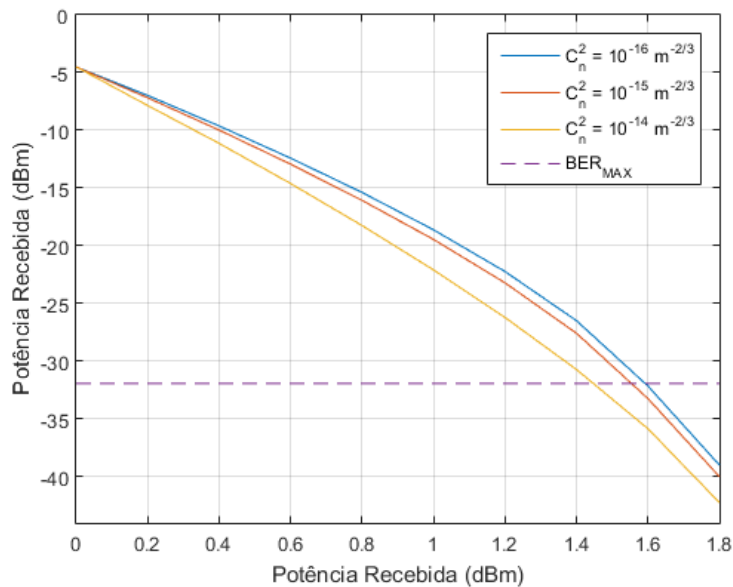


FIG. 4.24 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y .

Na FIG. 4.24, verifica-se que há uma maior atenuação devido ao desalinhamento nos eixos que foi adicionado no transmissor, que pode ser observada até mesmo para curtas distâncias, onde a maior potência observada foi de $-4,51$ dBm quando comparada com $-3,65$ dBm para o caso sem desalinhamento nos eixos x e y , da FIG. 4.22.

Esta configuração do transmissor que considera desalinhamento axial e angular simultaneamente em um meio turbulento com $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ corresponde a um cenário bastante comprometedor para o funcionamento do enlace, onde a distância máxima alcançada neste meio é de apenas $1,56$ km para o sistema FSO considerado nestas simulações, como pode ser observado na FIG. 4.25. Esta configuração resulta em uma penalidade de $1,66$ dB devido à turbulência, quando comparada à distância de $1,61$ km no meio não turbulento.

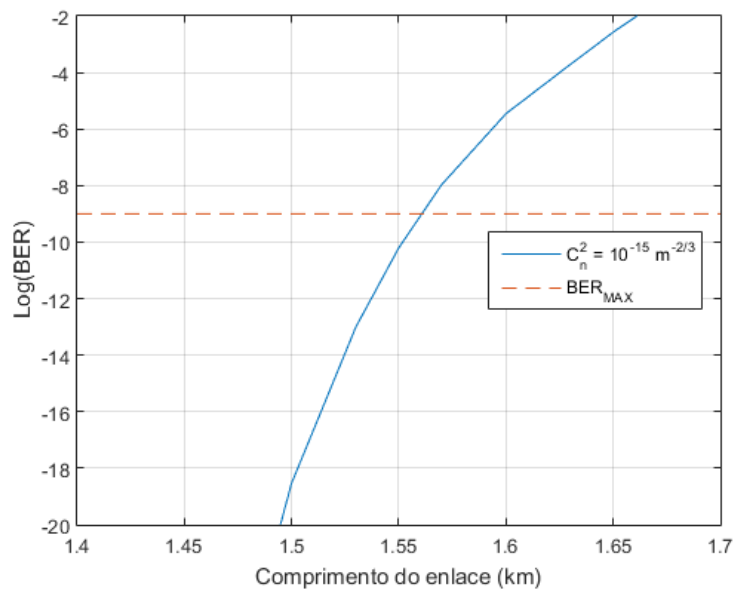


FIG. 4.25 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y .

A FIG 4.26 mostra três diagramas de olho obtidos através de simulações no programa OptiSystem, onde foi simulado um enlace de 2 km de comprimento, com $P_S = 15$ dBm e uma atenuação atmosférica de 9 dB/km. Cada um destes diagramas está associado a um nível de turbulência diferente. Desta forma, é possível observar a piora da BER do sistema com o aumento da turbulência atmosférica em um determinado meio onde o enlace FSO encontra-se em operação, mesmo sem a consideração de possíveis desalinhamentos no transmissor óptico, neste caso.

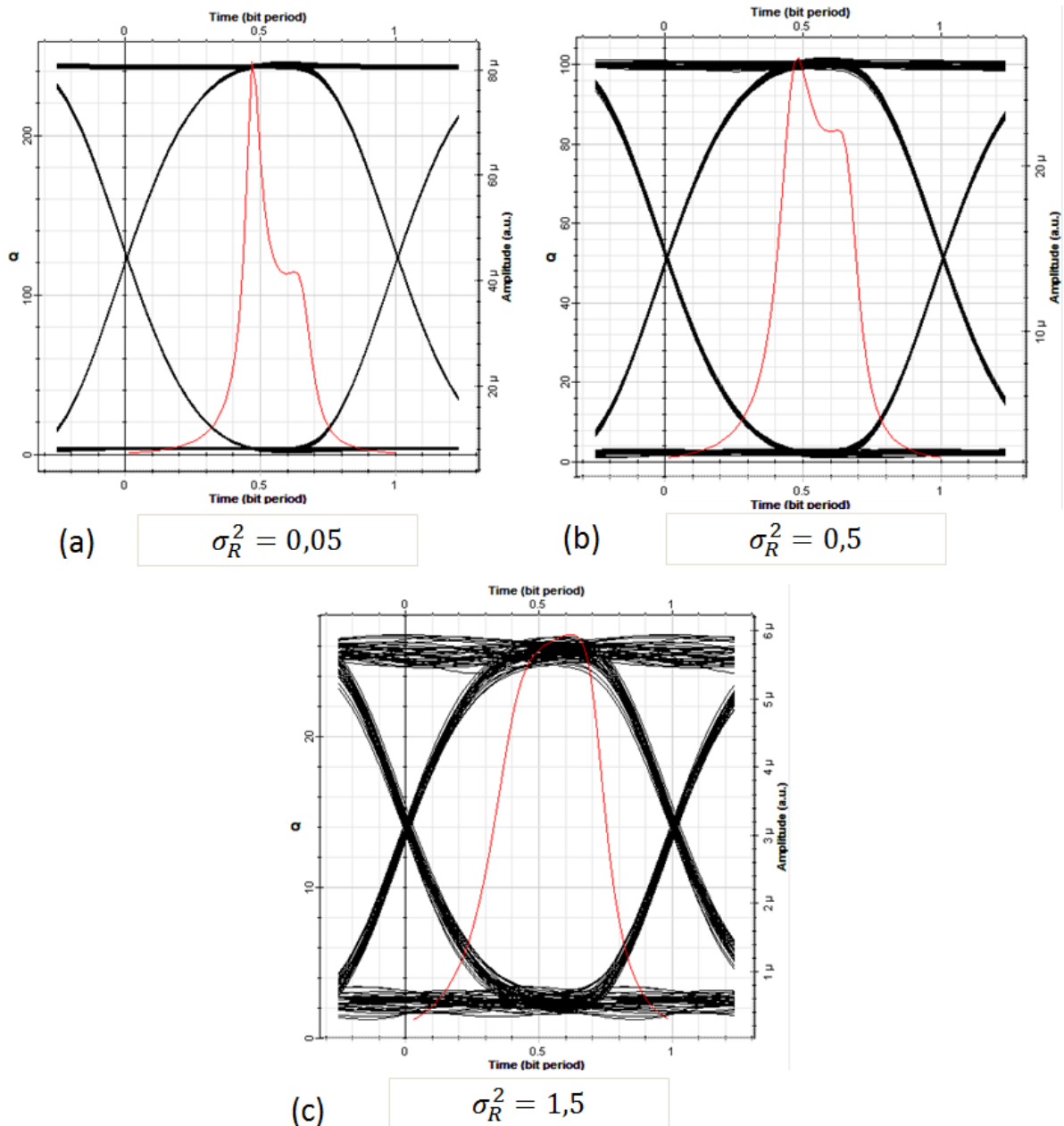


FIG. 4.26 Diagramas de olhos obtidos na ausência de um desalinhamento no enlace com:

(a) $\sigma_R^2 = 0,05$, (b) $\sigma_R^2 = 0,5$ e (c) $\sigma_R^2 = 1,5$.

Nota-se que, mesmo com a atenuação atmosférica considerada, o sistema será viável, até mesmo para o caso onde a turbulência no meio é forte.

Para avaliar o impacto do desalinhamento na atenuação da potência, foi realizada uma outra simulação com este mesmo enlace, porém agora considerando um deslocamento de 4 cm no eixo x , um deslocamento simultâneo de 4 cm no eixo y , um deslocamento de 0,02 mrad no ângulo de elevação, e um deslocamento de 0,02 mrad no ângulo de azimute. Os resultados desta simulação são mostrados nos diagramas de olho da FIG 4.27.

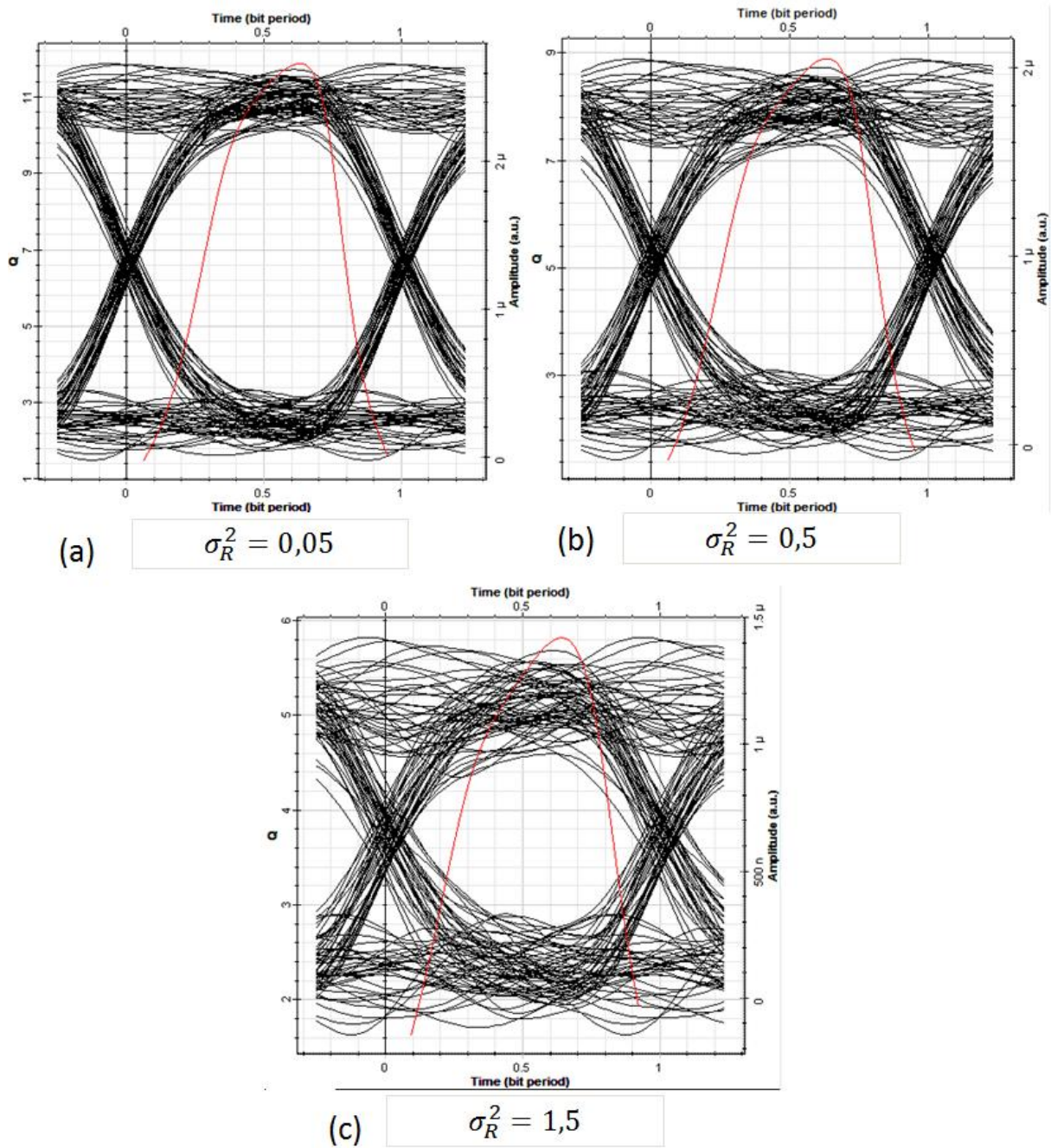


FIG. 4.27 Diagramas de olhos obtidos em um enlace com desalinhamento no transmissor e com: (a) $\sigma_R^2 = 0,05$, (b) $\sigma_R^2 = 0,5$ e (c) $\sigma_R^2 = 1,5$.

Nestes resultados, nota-se uma redução na abertura do olho além de um forte ruído. Com este desalinhamento, o sistema ainda funcionaria adequadamente em regimes de turbulência fraca a moderada, mas a alta taxa de erros de bits ao qual estaria sujeito em um regime de turbulência forte comprometeria severamente a viabilidade do sistema.

4.2 RESULTADOS PARA O SISTEMA OCDMA 1D

De forma similar ao sistema básico, diversas análises foram realizadas visando a avaliação do funcionamento de um enlace FSO onde a codificação OCDMA foi utilizada para estabelecer a comunicação simultânea de cinco usuários diferentes.

Em um primeiro instante, foi realizada uma simulação da potência que é recebida por um dos cinco usuários do sistema de acordo com o comprimento do enlace.

Portanto, primeiramente, foi considerado um enlace com um laser transmissor de potência óptica igual a 5 dBm, comprimento de enlace variando de 0 a 3 km e os três níveis de atenuação atmosférica que foram utilizados nas simulações da seção 4.1. Também foi considerado um meio de propagação não turbulento.

Os resultados desta primeira análise que emprega a tecnologia OCDMA é apresentada na FIG. 4.28. A linha tracejada mostra a sensibilidade do receptor que, neste caso, foi de - 47,22 dBm.

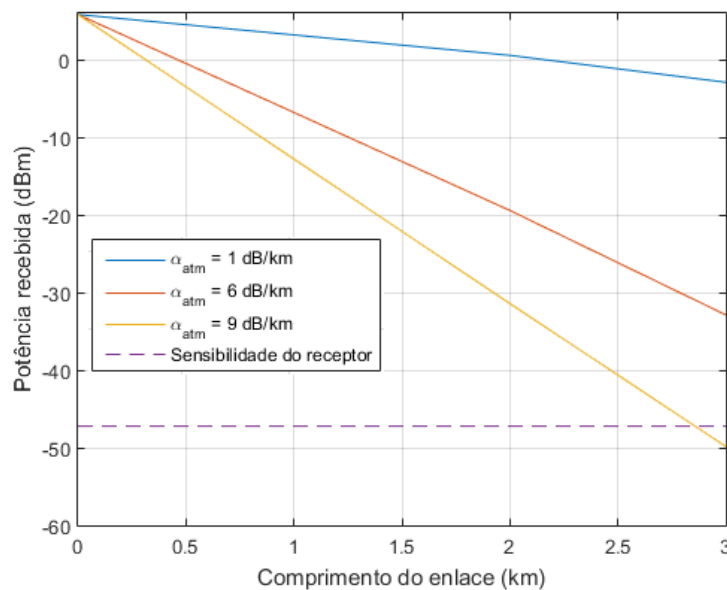


FIG. 4.28 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência – caso OCDMA.

Nesta simulação, verifica-se uma grande atenuação da potência do sinal nas curvas representadas pelas atenuações atmosféricas mais elevadas. Além da atenuação atmosférica,

apenas o efeito da divergência do feixe óptico, que alarga o sinal causando atenuação geométrica é considerado como uma fonte de atenuação adicional para este caso. Apesar de utilizar um laser com potência óptica de 5 dBm, os resultados mostram uma potência recebida igual a 5,84 dBm para enlaces de 0 km. Isto ocorre devido à ação dos amplificadores ópticos presentes no sistema e ao fato de que, em distâncias mínimas de enlace, os efeitos da divergência do feixe e da atenuação atmosférica são desprezíveis.

Simultaneamente, os resultados da BER para a curva referente a $\alpha_{atm} = 9$ dB/km foram obtidos e apresentados na FIG. 4.29, mostrando que nessas condições o enlace poderá ter uma distância máxima de 2,81 km, ou seja, 190 metros a menos do que a distância máxima possível no sistema simples nas mesmas condições.

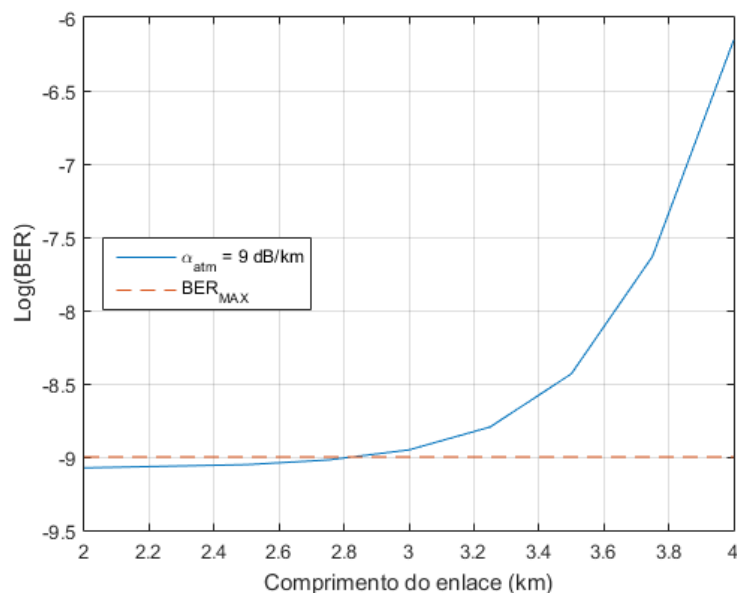


FIG. 4.29 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência – caso OCDMA.

O sistema OCDMA 1D projetado para estas simulações atende simultaneamente a 5 usuários. Para analisar a variação do valor da BER em relação ao comprimento do enlace neste sistema, o valor médio da BER dos 5 usuários foi considerado em todas os resultados das simulações mostradas neste capítulo.

Para obter os resultados de BER para o sistema OCDMA, foi utilizado um algoritmo desenvolvido para o programa MATLAB por (CARNEIRO, 2013), que obtém os dados das sequências de bits enviadas e compara com os bits recebidos, identificando aqueles que não

são detectados corretamente. Este algoritmo realiza um cálculo mais realista do que a estimativa de BER feita pelo componente do programa OptiSystem utilizado na análise de desempenho do sistema simples, que calcula valores de BER muito baixos para os casos onde as atenuações no enlace causadas pelo meio são pequenas. No caso do algoritmo utilizado para a análise do sistema OCDMA 1D, o valor de BER calculado para casos com baixas atenuações permanece próximo de 10^{-9} ao se propagar no meio, até que os efeitos de degradação do sinal, que adicionam ruído a este, tornem-se significativos o suficiente para que a BER seja piorada gradativamente conforme a distância do enlace se estende.

Ainda considerando o meio não turbulento, foi adicionado na simulação diferentes valores de deslocamentos laterais no eixo y para o transmissor. Desta forma, a potência detectada pelo receptor foi mensurada em cada um destes casos, em função do comprimento, como mostra a FIG. 4.30. Quanto maior o desalinhamento axial presente no transmissor, maior será a atenuação geométrica. Porém, com o aumento da distância e o consequente aumento da área do feixe, a área deste tende a englobar a área do receptor, o que reduz cada vez mais a diferença da potência detectada em um enlace perfeitamente alinhado em comparação aos enlaces com desalinhamento axial.

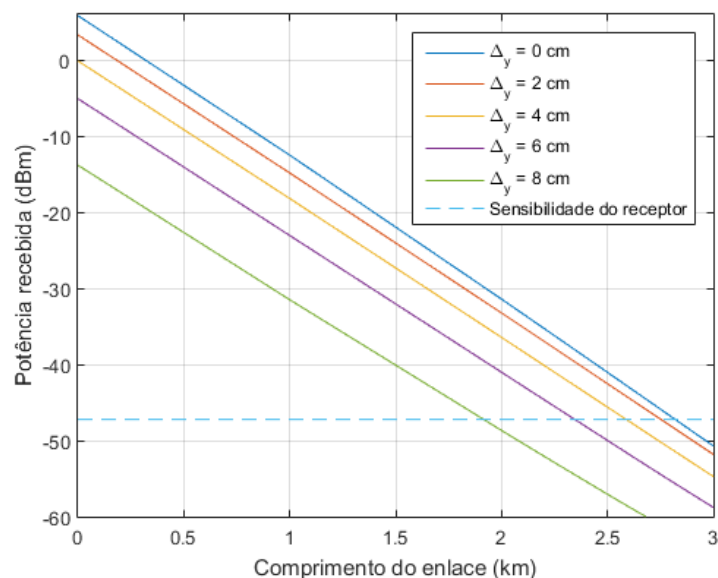


FIG. 4.30 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento – caso OCDMA.

Para uma melhor visualização da queda na qualidade do funcionamento do sistema, provocada pelo desalinhamento no transmissor, os resultados referentes à BER nesta

simulação também foram obtidos e são mostrados na FIG. 4.31, evidenciando grande piora no seu valor para grandes valores de desalinhamento axial, o que reduz drasticamente a distância máxima permitida para o enlace nestes casos.

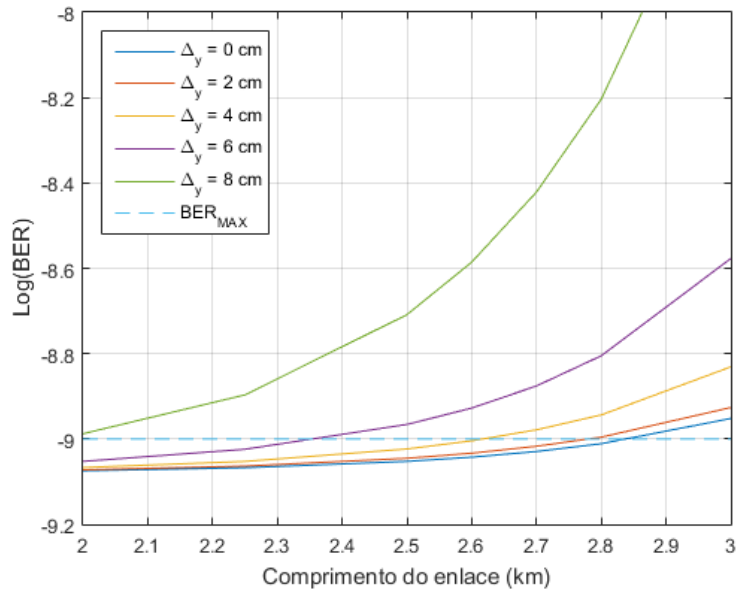


FIG. 4.31 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento – caso OCDMA.

Também para um laser com potência óptica de 5 dBm, foi realizada a simulação considerando um desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y , como mostrado na FIG. 4.32. Devido a este desalinhamento, a potência máxima medida será de $-0,6$ dBm, e uma redução no valor da potência recebida é observada com o aumento da distância, como era de se esperar. Além disso, a ação da atenuação atmosférica na perda de potência do sinal age conjuntamente com esse desalinhamento, e isso pode ser observado na FIG. 4.32.

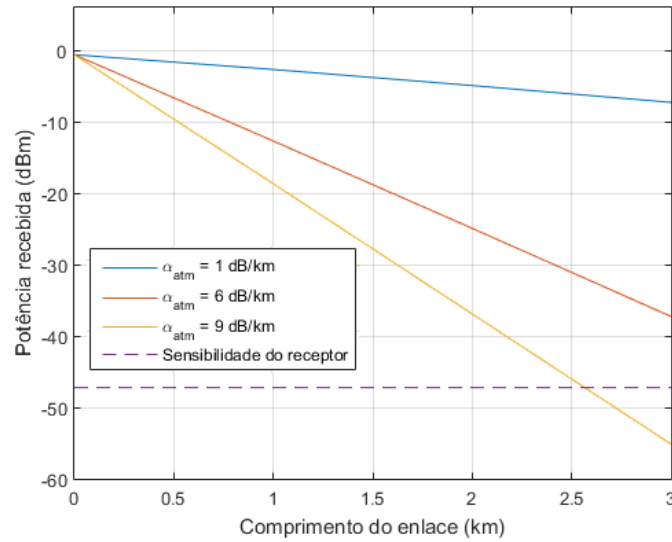


FIG. 4.32 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.

Para esta simulação, considerando o meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km, a FIG. 4.33 representa a variação da BER do sistema com o aumento da distância, mostrando que o desalinhamento imposto nos dois eixos, neste caso, limita o comprimento máximo do enlace a 2,52 km.

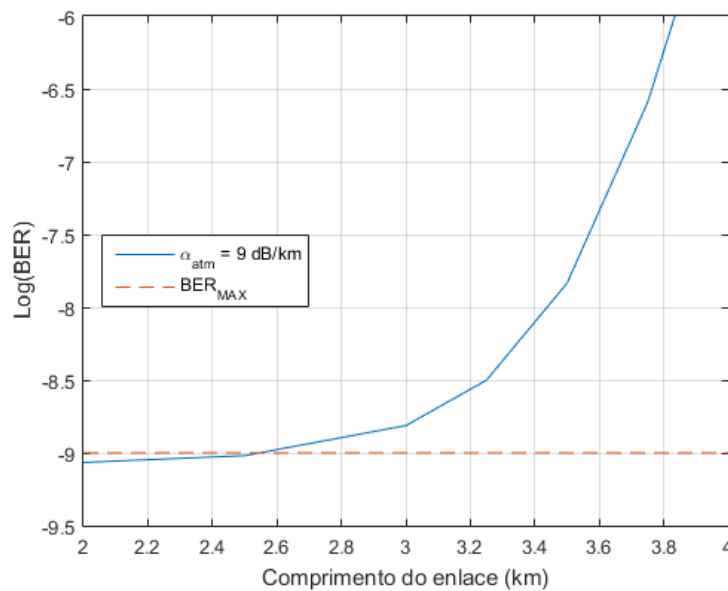


FIG. 4.33 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.

Considerando agora uma variação angular de 0,05 mrad no ângulo de elevação, a atenuação no enlace foi analisada para três coeficientes de atenuação atmosférica diferentes, como pode ser observado na FIG. 4.34. Novamente, observa-se que esta variação angular não possuirá grande impacto na atenuação geométrica resultante para curtas distâncias, mas esse impacto se agrava com o aumento da distância propagada, atenuando cada vez mais o sinal.

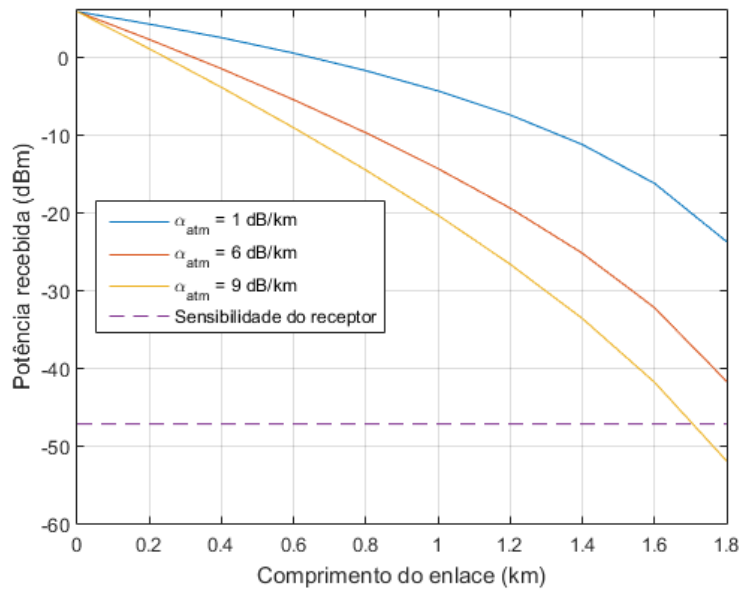


FIG. 4.34 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação – caso OCDMA.

A FIG 4.35 ilustra o resultado de variação da BER referente à curva obtida nesta simulação para um meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km. Esse resultado mostra a ação da variação angular no transmissor na degradação do sinal, onde a adição deste pequeno ângulo de elevação no transmissor reduz o comprimento máximo do enlace neste meio de 2,81 km para 1,71 km. Isso significa que, para distâncias maiores do que 2 km, uma mínima variação angular é suficiente para prejudicar e impedir totalmente a operação adequada do sistema.

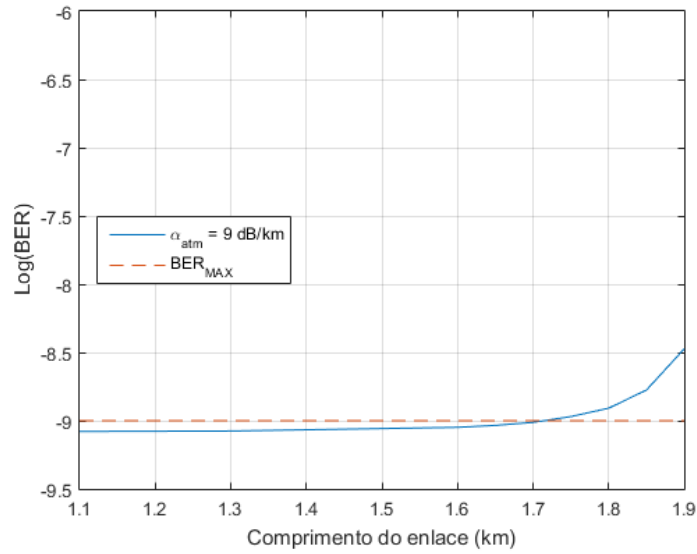


FIG. 4.35 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação – caso OCDMA.

Considerando além da variação no ângulo de elevação, um desalinhamento de 1 cm nos eixos x e y do transmissor, foram obtidos os resultados mostrados na FIG. 4.36.

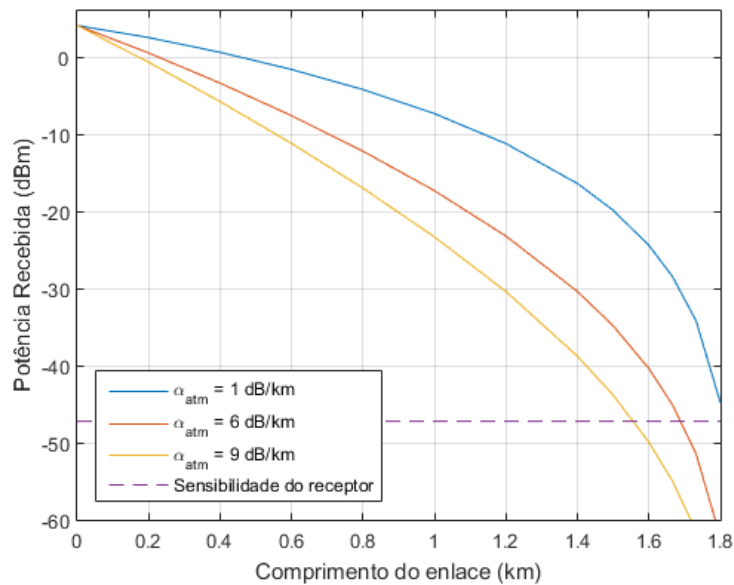


FIG. 4.36 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y – caso OCDMA.

Neste resultado, além da ação da variação angular mostrada na FIG. 4.34, a adição de um deslocamento nos eixos x e y reflete em uma atenuação geométrica que reduz a potência máxima detectada para 4,12 dBm, comparada com 5,84 dBm para o caso sem deslocamento nos eixos x e y da FIG. 4.34 e segue causando uma atenuação adicional para todas as distâncias simuladas. Para o caso do meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km, esta configuração de desalinhamento no transmissor reflete em uma distância máxima de 1,56 km, como é observado na FIG. 4.37.

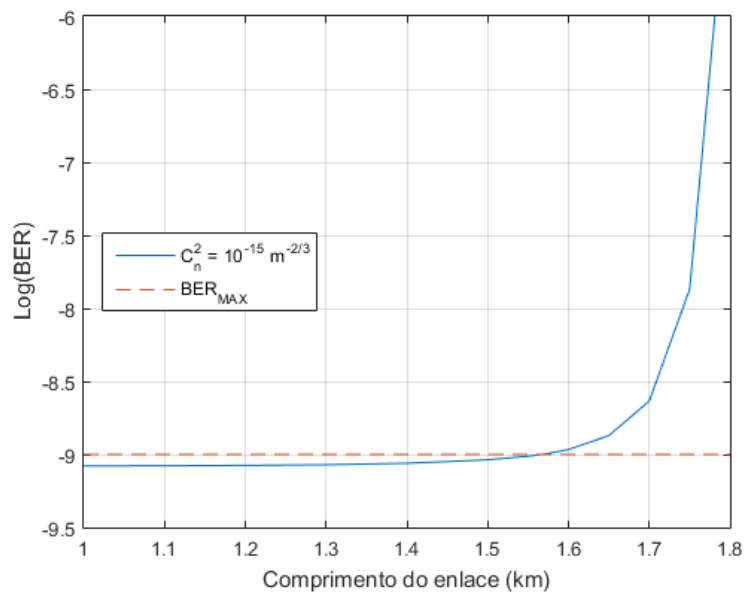


FIG. 4.37 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio sem turbulência e com desalinhamento no ângulo de elevação e nos eixos x e y – caso OCDMA.

Assim como foi feito no caso do sistema simples, a ação da turbulência atmosférica sobre o feixe óptico também foi implementada no caso do sistema OCDMA. A FIG. 4.38 apresenta os resultados que foram obtidos nesta simulação, também com $P_S = 5$ dBm, considerando-se três níveis de turbulência, representados por C_n^2 em um meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km. Ao comparar estes resultados com os da FIG. 4.28, nota-se que a adição dos efeitos de vagueamento e espalhamento do feixe e também da cintilação neste enlace causa uma atenuação significativa na potência recebida, até mesmo para um $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, onde a turbulência será mais fraca, atingindo atenuações cada vez maiores com o aumento de C_n^2 , pois isto intensifica os efeitos da turbulência no feixe, gerando mais perdas de potência e mais

ruído. A variação da BER nesta simulação para a curva com $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ é mostrada na FIG. 4.39, onde verifica-se que, ao considerar um meio com turbulência moderada, o tamanho máximo do enlace passa a ser de 2,50 km, ou seja, 310 metros a menos do que um meio sem turbulência observado na FIG. 4.29.

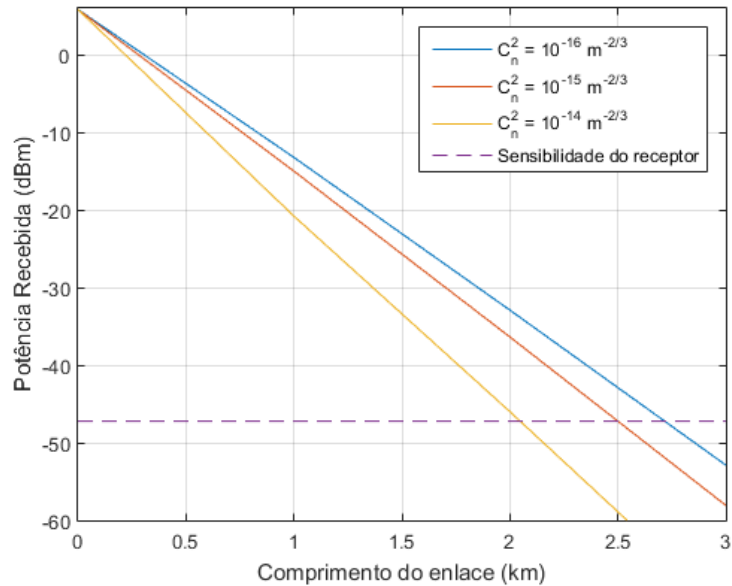


FIG. 4.38 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio turbulento - OCDMA.

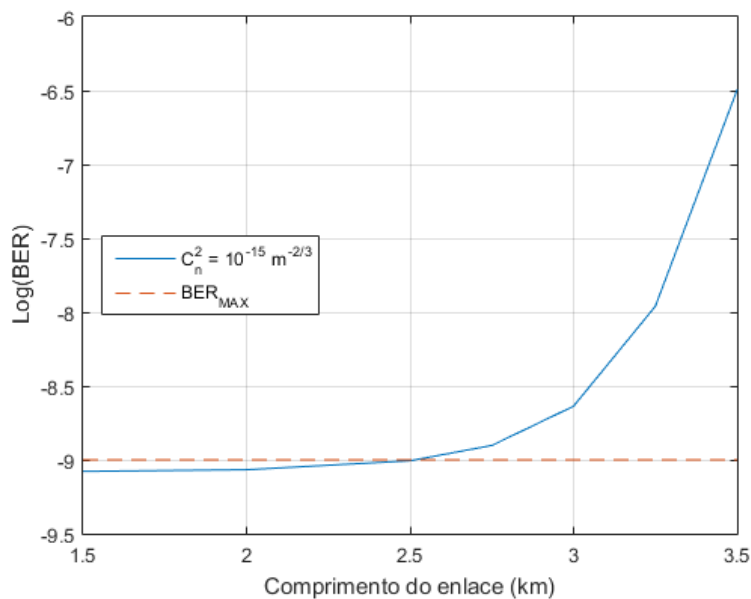


FIG. 4.39 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio turbulento - OCDMA.

Neste caso, obteve-se uma penalidade de 6,78 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 2,81 km no meio não turbulento.

Além da presença da turbulência e seus efeitos no enlace, foram simulados e analisados diferentes valores de desalinhamento no eixo x para um meio com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km e $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, como mostra a FIG. 4.40.

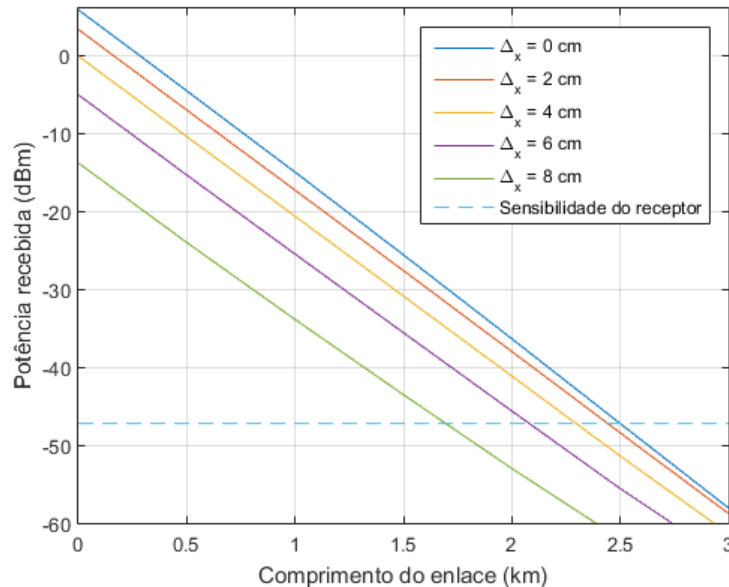


FIG. 4.40 Potência recebida em função do comprimento do enlace em meio turbulento e com desalinhamento – caso OCDMA.

Neste resultado, verifica-se que, apesar de uma maior atenuação instantânea em casos onde o desalinhamento no transmissor é maior, a potência recebida tende a convergir para um mesmo valor após a propagação do feixe óptico por um enlace suficientemente longo. Isto ocorre pois, devido à divergência e ao aumento de área sofrido pelo feixe ao se propagar, o desalinhamento deixa de ser impactante na atenuação geométrica quando a circunferência descrita pelo raio do feixe passa a não mais interceptar a área de circunferência do receptor. Portanto, quando isto ocorre, a área do receptor passa a se encontrar totalmente contida dentro da área do feixe e, por se tratar de uma distribuição de intensidade uniforme, a atenuação geométrica passa a ser descrita por uma simples razão entre a área do receptor e a área do feixe, para todos os casos.

O resultado de BER foi obtido a fim de comparar os casos com diferentes desalinhamentos, mostrando uma crescente redução do comprimento máximo do enlace em

função do aumento do desalinhamento axial, chegando a ser reduzido para 2,31 km, como mostra a FIG. 4.41, quando o desalinhamento é de 4 cm. Neste caso, obteve-se uma penalidade de 6,43 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 2,61 km no meio não turbulento.

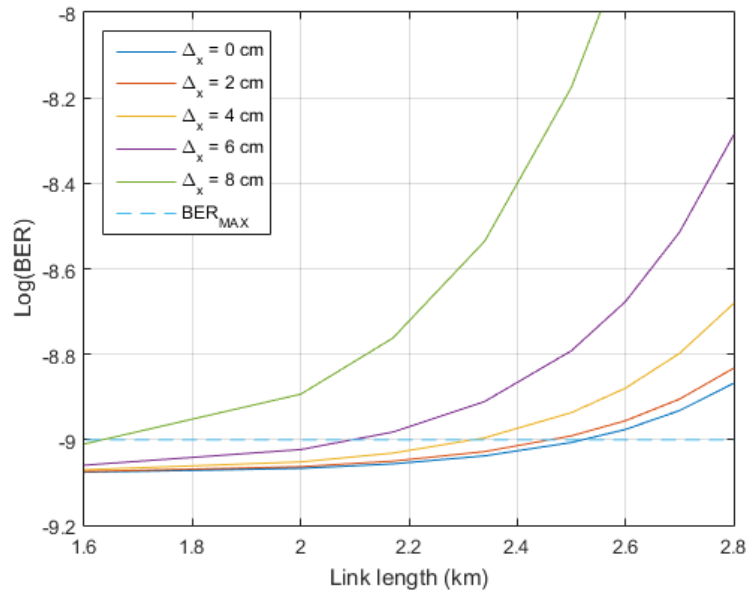


FIG. 4.41 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento – caso OCDMA.

Considerando ainda a propagação de um feixe com potência óptica de 5 dBm transmitido em um meio turbulento, foi realizada a simulação para turbulência fraca, média e forte considerando um desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y , simultaneamente, e o resultado é mostrado na FIG. 4.42.

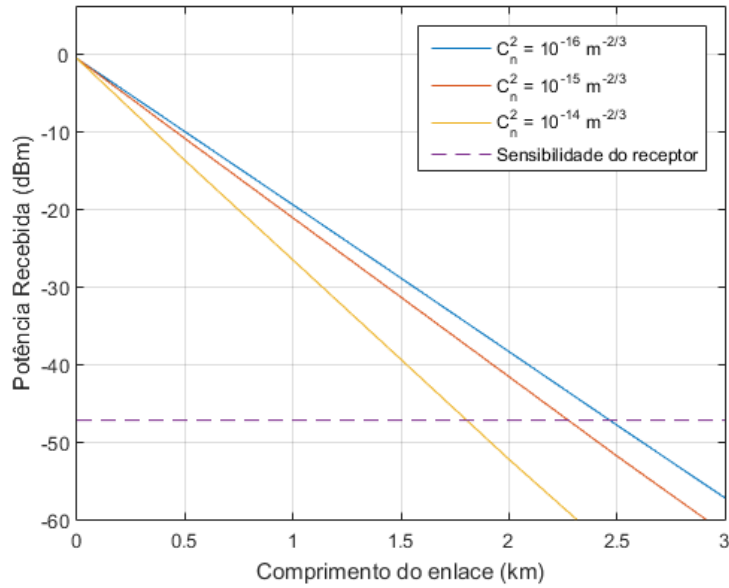


FIG. 4.42 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.

O desalinhamento imposto nos dois eixos provoca uma atenuação no enlace, reduzindo a potência máxima medida para $-0,6$ dBm. Esta atenuação, aliada aos efeitos da turbulência, mantêm-se significativa para todas as distâncias medidas. A BER obtida para a curva com $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ é mostrada na FIG. 4.43, onde verifica-se que este desalinhamento axial reduz o comprimento máximo do sistema para 2,3 km. Neste caso, obteve-se uma penalidade de 5,02 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 2,52 km no meio não turbulento.

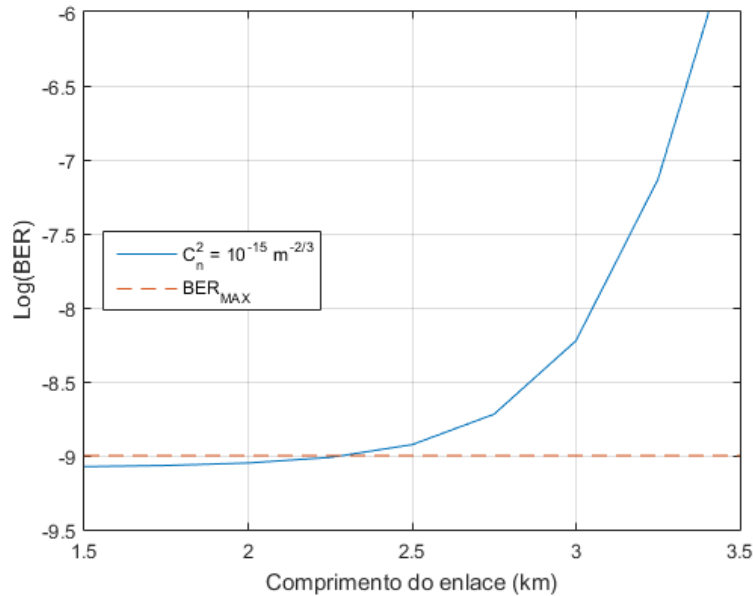


FIG. 4.43 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y – caso OCDMA.

Ao analisar um feixe transmitido com 5 dBm em um meio turbulento e com $\alpha_{atm} = 9$ dB/km, os resultados considerando uma variação angular de 0,05 mrad no ângulo de azimute foram verificados, como está mostrado pela FIG. 4.44. Para este caso, considerando o sistema OCDMA 1D, grandes perdas de potência foram detectadas com o aumento progressivo do enlace, devido à ação conjunta da variação do ângulo de azimute e dos efeitos da turbulência, principalmente da cintilação, que causa maiores atenuações para enlaces mais longos.

A FIG. 4.45 mostra que este sistema possui bom funcionamento considerando $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ até 1,65 km, onde a partir deste valor a atenuação do sinal torna-se suficientemente grande para inviabilizar a operação do enlace. Neste caso, foi obtida uma penalidade de 3,71 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 1,71 km no meio não turbulento.

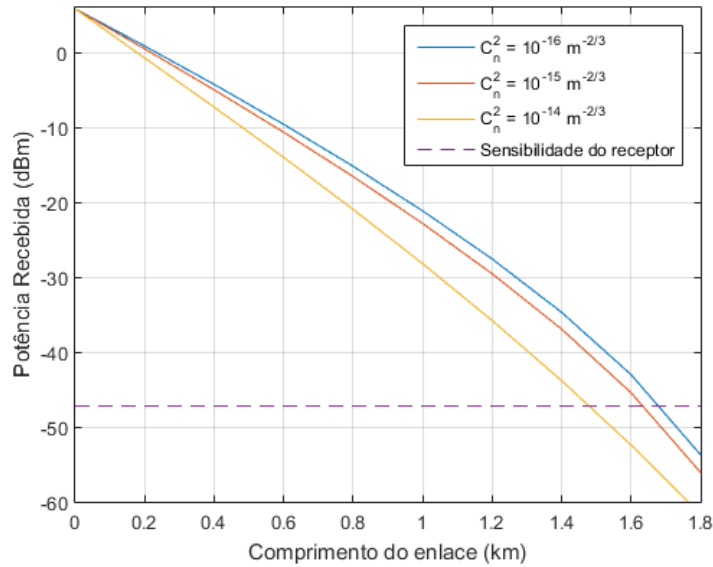


FIG. 4.44 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute – caso OCDMA.

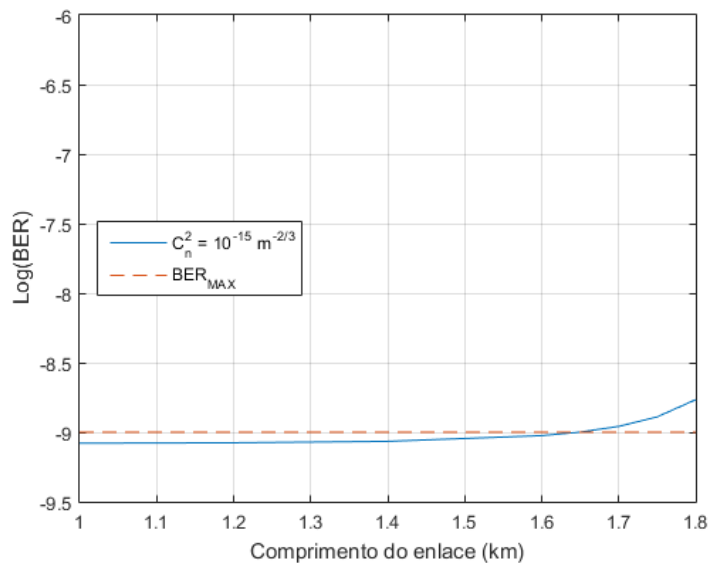


FIG. 4.45 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute – caso OCDMA.

Em seguida, foi adicionado ao transmissor além da variação angular de 0,05 mrad no azimute também um deslocamento de 1 cm nos eixos x e y . O comportamento das curvas permanece similar, mas observa-se neste caso uma redução da potência máxima medida para 4,12 dBm, que é fruto deste desalinhamento axial adicionado. Numa distância próxima a 1,7 km, o desalinhamento total passa a ser muito grande, fazendo com que a área do feixe não

mais intercepte a área do receptor. Por este motivo, o nível de potência recebida para os menores níveis de turbulência da FIG. 4.46 aproximam-se neste comprimento de enlace.

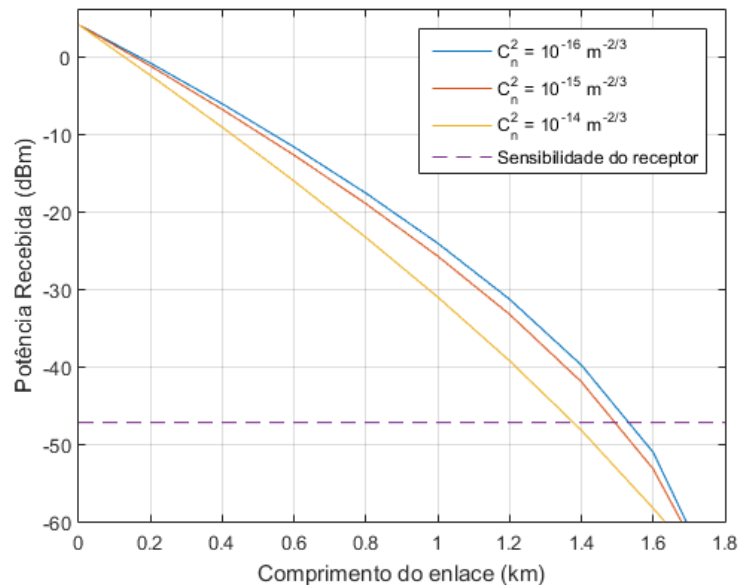


FIG. 4.46 Potência na recepção com o aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y – caso OCDMA.

Este efeito pode ser melhor observado na abrupta piora da BER após a distância de 1,7 km observada na FIG. 4.47, que também mostra que, para esta configuração de desalinhamento no transmissor, o comprimento máximo do enlace será de 1,51 km. Este resultado volta a confirmar a importância do alinhamento para o funcionamento apropriado do sistema FSO, pois um pequeno desalinhamento nos eixos x e y e uma variação no ângulo de azimute foi capaz de reduzir o alcance do enlace em 990 metros quando comparado ao resultado sem desalinhamento, mostrado na FIG. 4.39. Foi observada, neste caso, uma penalidade de 3,44 dB devido à turbulência, quando comparado à distância de 1,56 km no meio não turbulento.

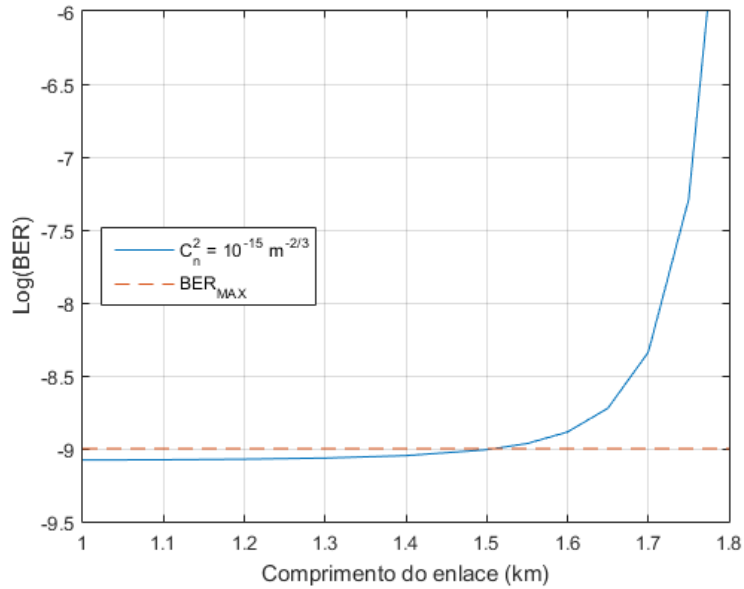


FIG. 4.47 BER em relação ao aumento do comprimento do enlace em meio com turbulência e com desalinhamento no ângulo de azimute e nos eixos x e y – caso OCDMA.

4.3 ALARGAMENTO TEMPORAL DO PULSO

Nesta seção, o alargamento temporal do pulso óptico decorrente da interação do feixe com o meio turbulento será avaliado. Os resultados obtidos foram baseados na análise da EQ. 2.50, onde observa-se que o fenômeno do alargamento temporal do pulso será dependente dos valores da largura inicial do pulso T_0 , do comprimento do enlace L , mas também das características relacionadas ao meio turbulento: parâmetro estrutural do índice de refração C_n^2 e escala externa da turbulência L_0 . As simulações de alargamento do pulso foram realizadas ao implementar as expressões da seção 2.3.3.4 no programa MATLAB.

4.3.1 ALARGAMENTO DE ACORDO COM A LARGURA INICIAL

Primeiramente, um estudo da variação do alargamento percentual do pulso óptico foi feito de acordo com a meia largura inicial T_0 empregada. Na primeira análise realizada, foi obtido o percentual de alargamento para três valores de turbulência e, conseqüentemente, de C_n^2 diferentes (turbulência fraca: $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, média: $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ e forte: $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$). O enlace considerado possui um comprimento $L = 500 \text{ m}$, e foi empregado o comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$ e uma escala externa da turbulência $L_0 = 10 \text{ m}$. A avaliação do alargamento de um pulso para este enlace em meio turbulento foi realizada através da teoria fornecida no capítulo 2, e o resultado está mostrado na FIG. 4.48.

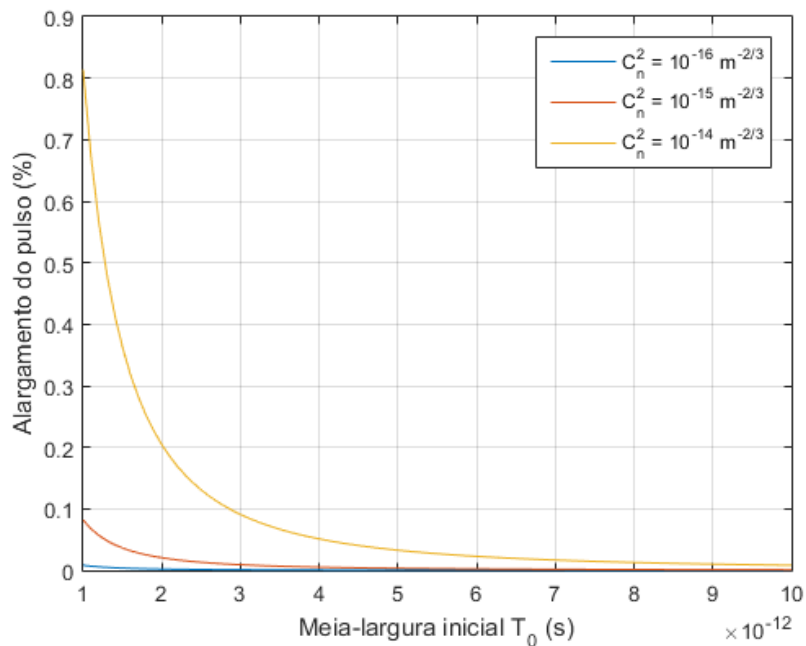


FIG. 4.48 Alargamento do pulso em função da largura inicial do pulso.

Nessa análise, é possível observar que o alargamento sofrido pelo pulso ao se propagar em um meio turbulento é maior no trecho das curvas que vai até 3 ps de largura inicial do pulso, principalmente para o caso onde a turbulência é forte. Portanto, nota-se que um regime de turbulência forte causa uma maior dispersão no pulso óptico do que um regime de turbulência fraca ou moderada, que neste caso causaram alargamentos desprezíveis.

Em uma segunda análise, foi simulado um enlace baseado na comunicação entre drones, ou veículos aéreos não tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* – UAVs), realizado a 13,72 km do solo terrestre. Nesta simulação, que também utilizou os parâmetros $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ e $L_0 = 10$ m, supôs-se uma distância total do enlace de $L = 100$ km entre os UAVs (YOUNG, 1998).

Para este caso, as três curvas de alargamento obtidas foram analisadas em função de diferentes valores de variância de Rytov σ_R^2 . Como os efeitos da cintilação sobre o feixe óptico diminuem conforme a distância entre o enlace e o solo terrestre aumenta, a simulação considerou apenas os valores de $\sigma_R^2 = 0,2$, $\sigma_R^2 = 0,5$ e $\sigma_R^2 = 0,8$, todos referentes a regimes de turbulência fraca. A FIG. 4.49 ilustra os resultados desta simulação.

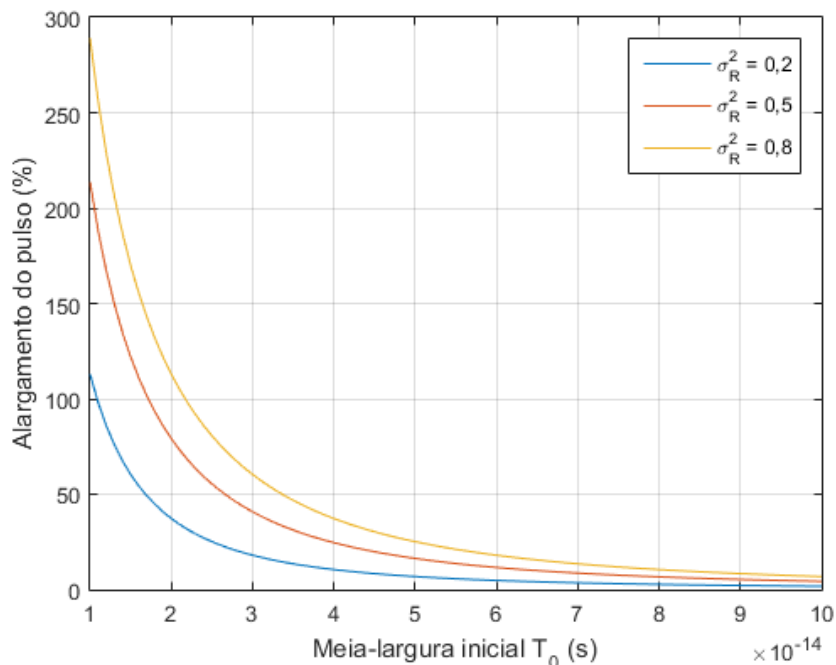


FIG. 4.49 Alargamento do pulso em função da largura inicial do pulso em um enlace aéreo entre UAVs.

Mesmo considerando apenas regimes de turbulência fraca na FIG. 4.49, o alargamento percentual neste caso será maior, devido à grande distância entre os UAVs neste enlace.

Considerando, ainda para estes resultados, um pulso cuja meia-largura inicial é de $T_0 = 20$ fs terá, no melhor caso (curva de $\sigma_R^2 = 0,2$), um alargamento de 37% ao se propagar neste enlace. No entanto, este caso se trata de uma condição ideal que desconsidera as atenuações pelas quais o sinal é submetido na atmosfera e, um comprimento de enlace como o apresentado não é viável em aplicações comerciais.

4.3.2 ALARGAMENTO DE ACORDO COM A DISTÂNCIA

Para a propagação de um pulso de $T_0 = 2$ ps, foi obtido o percentual de alargamento deste pulso em função da distância do enlace óptico para os três valores de C_n^2 utilizados na FIG 4.48. Os resultados obtidos por esta simulação são ilustrados na FIG. 4.50.

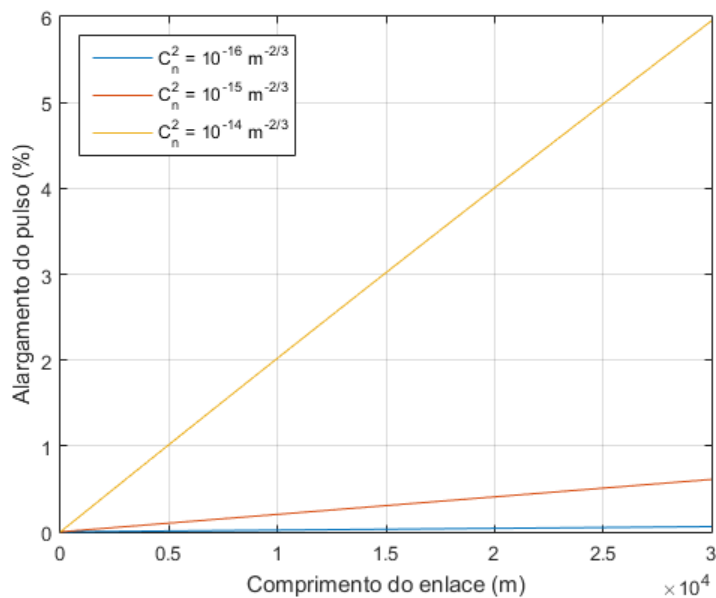


FIG. 4.50 Alargamento do pulso pela distância do enlace.

Com o aumento da distância, é evidenciado nos resultados mostrados na FIG. 4.50 que pulsos ópticos ao se propagarem em meio com fraca turbulência sofrem um alargamento percentual muito pequeno e desprezível, até mesmo para grandes distâncias. Para regimes com turbulência forte, o alargamento obtido será maior, chegando a 6 % neste caso em 30 km. Entretanto, este resultado de alargamento só é obtido para um enlace de 30 km, que é um comprimento inviável para aplicações reais. Ainda neste caso, em um enlace com 1 km, o alargamento máximo será de 2 %.

Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que a análise do alargamento temporal percentual óptico sofrido por um pulso que se propaga em um enlace FSO só possui relevância para pulsos ultracurtos da ordem de femtosegundos e quando grandes distâncias são consideradas. No entanto, para sistemas OCDMA, o alargamento do pulso é mais impactante e precisa ser avaliado, pois o período do *chip* é muito menor que o período do bit.

5. CONCLUSÃO, TRABALHOS FUTUROS E ARTIGOS

Neste trabalho, foi realizado um estudo das características da propagação de um feixe óptico em um enlace FSO, onde o objetivo foi a avaliação e a análise dos efeitos atmosféricos que prejudicam o estabelecimento da comunicação. O foco deste trabalho foi concentrado nas atenuações causadas pela influência da turbulência atmosférica.

Inicialmente, foi discutido o contexto histórico que motivou o desenvolvimento da tecnologia FSO, bem como a situação na qual a pesquisa sobre óptica no espaço livre se encontra atualmente, sendo uma alternativa para a solução do problema de última milha. Assim, para a implementação deste sistema nas grandes cidades, um estudo de suas características básicas e dos fatores que influenciam a sua operação se fazem necessários.

O sistema básico de um enlace FSO foi apresentado, onde os principais elementos que o compõem foram brevemente discutidos. Foi discutido o conceito de abertura do feixe e de irradiância (ou intensidade óptica), para que fossem mostrados os tipos de representação da distribuição de irradiância comumente utilizados, presentes na área descrita pela seção reta de um feixe luminoso que se propaga pelo caminho óptico. Estes dois tipos de distribuição de irradiância são a distribuição gaussiana (para feixes gaussianos, que se aproximam mais de uma modelagem real), e a distribuição uniforme (utilizada para modelar feixes cônicos), cujo campo de irradiância, ao se propagar, assume a forma conhecida como *top-hat* (RODRIGUES, 2012).

Em seguida, um estudo sobre as atenuações no sinal óptico causadas pela interação com o meio atmosférico foi realizado. Foram fornecidas as considerações básicas teóricas necessárias para a avaliação dos efeitos de absorção e espalhamento, que caracterizam a atenuação atmosférica em um meio – efeito que pode ser extremamente danoso à comunicação, inclusive impedindo totalmente a sua viabilidade, dependendo dos fenômenos meteorológicos presentes no meio. Também foi abordada a teoria que descreve a atenuação geométrica que ocorre devido ao aumento da área do feixe óptico decorrente do efeito da difração.

Sabe-se que o sistema FSO está sujeito a possíveis desalinhamentos, advindos de diversas fontes, entre o transmissor e o receptor óptico. Portanto, este trabalho realizou um estudo a fim de fornecer expressões para a modelagem da perda de potência que decorre destes

possíveis desalinhamentos, e que contribuem com a atenuação geométrica. Uma análise teórica foi discutida, tanto para feixes com distribuição de intensidade gaussiana, quanto para feixes cônicos. Para este segundo caso, cuja análise foi estendida e utilizada para as simulações presentes nesta dissertação, códigos de computação no programa MATLAB foram desenvolvidos com o objetivo de calcular a atenuação geométrica total.

Como foco principal deste trabalho, a teoria necessária para a análise dos efeitos da turbulência atmosférica foi apresentada e discutida, e as expressões que descrevem seus fenômenos, quais sejam, o vagueamento do feixe, o espalhamento do feixe e a cintilação, foram mostradas, para que um enlace FSO em meio turbulento possa ser adequadamente simulado de forma analítica.

Foram mostradas as expressões necessárias para a compreensão do efeito de espalhamento do feixe, que causa um alargamento adicional à área do feixe que se propaga em um meio turbulento, além do alargamento previsto apenas pelo efeito da difração óptica. Além deste, o vagueamento do feixe, também decorrente da turbulência atmosférica, foi apresentado e foi mostrado que este redirecionamento aleatório causado no feixe ocorre simultaneamente ao fenômeno do alargamento, causando assim problemas na detecção do sinal. Para a avaliação do fenômeno da cintilação, que é o principal efeito da turbulência, por afetar diretamente a irradiância do sinal, foi apresentada uma expressão que permite a caracterização deste fenômeno de forma analítica. Desta forma, todos os efeitos da turbulência que comprometem o sinal óptico puderam ser equacionados simultaneamente e permitiram o cálculo da potência recebida em um enlace FSO.

Outra análise realizada neste trabalho foi da avaliação do alargamento temporal sofrido pelo pulso óptico ao se propagar por um meio turbulento, onde expressões essenciais para o seu estudo e entendimento foram apresentadas.

No capítulo 3 desta dissertação, foram apresentados os dois sistemas escolhidos para simular a modelagem do canal FSO através das expressões fornecidas. Para isto, foi utilizado um sistema simples, composto apenas por um transmissor, um receptor e o meio de propagação (descrito por um código elaborado no programa MATLAB), e também um sistema que utiliza a técnica de codificação OCDMA que, neste trabalho, através da utilização de códigos primos, foi capaz de estabelecer a comunicação para 5 usuários diferentes que compartilham o mesmo meio de propagação. O canal FSO é descrito pelo mesmo código computacional utilizado na simulação do sistema básico. Para simular ambos os sistemas propostos, o programa OptiSystem foi utilizado juntamente com o código do canal FSO

desenvolvido em MATLAB, afim de gerar os resultados de BER, fator de qualidade Q e da potência recebida em cada uma das simulações realizadas.

Em ambos os sistemas simulados, foi analisado primeiramente um meio sem a presença de turbulência atmosférica, para uma possível comparação de viabilidade com os enlaces em meios turbulentos, cujas simulações também foram apresentadas. Desta forma, foi possível observar que a presença da turbulência no meio restringe o comprimento total do enlace, causando uma redução de mais de 300 metros na distância máxima permitida para a operação do sistema, dependendo dos parâmetros utilizados. Para o sistema básico, a penalidade devido à turbulência observada foi de 3,79 dB. Para o sistema OCDMA, esta penalidade de potência foi de 6,78 dB.

Também foi visto que a presença de possíveis desalinhamentos no enlace afeta a viabilidade do sistema ao aumentar a atenuação geométrica. Ao considerar, além dos efeitos da turbulência, um desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y , a distância máxima do enlace já se reduz a 2,45 km no sistema básico e a 2,3 km no sistema OCDMA, para os parâmetros utilizados. As penalidades de potência devido à turbulência observadas neste caso foram, respectivamente, de 3,07 dB e 5,02 dB. Foi visto que uma pequena variação angular no transmissor causa grandes atenuações geométricas no feixe transmitido, limitando o comprimento do enlace a 1,71 km no sistema básico e a 1,65 km quando há a adição de um ângulo de 0,05 mrad no eixo de elevação, para os parâmetros utilizados. Nestes casos, foram observadas penalidades de potência devido à turbulência de 1,84 dB e 3,71 dB, respectivamente. Ao analisar um enlace FSO onde o transmissor possui 1 cm de deslocamento nos eixos x e y , além de um deslocamento angular de 0,05 mrad, a presença da turbulência reduziu o comprimento máximo do enlace para 1,56 km no sistema básico e 1,51 km no sistema OCDMA, e penalidades de potência de 1,66 dB e 3,44 dB, respectivamente, foram obtidas.

Por fim, também foi mostrado o efeito do alargamento temporal do pulso óptico ao se propagar em um meio turbulento. Estes resultados mostram que o alargamento resultante, causado pela turbulência atmosférica, só afetará sistemas que utilizam pulsos ultracurtos, da ordem de femtosegundos. Portanto, esta não deve ser considerada uma preocupação nos sistemas atuais, que ainda não apresentam taxas de modulação tão elevadas. No entanto, a sua compreensão é necessária para buscar formas de contornar este problema em aplicações futuras. Entretanto, o impacto do alargamento temporal do pulso em aplicações FSO com

codificação OCDMA precisa ser avaliado, pois mesmo pequenos percentuais de alargamento podem causar interferência entre os *chips* transmitidos.

Em suma, este trabalho contribuiu com a literatura de modo a descrever métodos analíticos para a avaliação de enlaces FSO sob regimes de fraca a forte turbulência, buscando relacionar a distância máxima que um enlace deve possuir ao ser instalado, de acordo com as características de espalhamento, absorção e do parâmetro estrutural do índice de refração observados no meio atmosférico local. Além disso, ressalta-se a contribuição desta dissertação para as estimativas do aumento da BER decorrentes de possíveis desalinhamentos no enlace, através do código elaborado para este cálculo. Por fim, este trabalho também contribui com expressões e análises para descrever o alargamento temporal do pulso óptico ao se propagar em um meio turbulento.

Portanto, já prevendo os problemas que o emprego de pulsos ultracurtos em enlaces FSO possam gerar no futuro, pesquisas que busquem implementar o efeito deste fenômeno na simulação de enlaces FSO em meios turbulentos são sugeridos.

Sugere-se também que os estudos nesta área busquem expressões para relacionar as expressões de espalhamento e vagueamento do feixe óptico presentes neste trabalho com modelos de análise probabilísticas de avaliação dos efeitos da cintilação, como o modelo proposto por (RODRIGUES, 2012), que utilizou a modelagem gama-gama para a avaliação do fenômeno da cintilação, principalmente para meios com regime de forte turbulência.

Trabalhos futuros também podem focar na implementação das expressões de índice de cintilação axial e radial (ANDREWS, 2005) com o modelo de análise proposto neste trabalho, e estender essa pesquisa para obter valores da atenuação devido à cintilação para sistemas com tecnologia de *tracking* (RECOLONS, 2007), que são úteis em aplicações práticas para reduzir os efeitos de vagueamento do feixe, além de possibilitarem a utilização de feixes com menores ângulos de divergência, o que possibilitaria uma economia de potência necessária para a transmissão do feixe (WILLEBRAND, 2001).

Além disso, pesquisas que busquem inserir no contexto deste trabalho a modelagem de feixes divergentes e convergentes são encorajadas, assim como a modelagem de feixes com distribuição gaussiana.

5.1 TRABALHOS ACEITO E SUBMETIDO

5.1.1 ARTIGO ACEITO SOBRE MODELAGEM DO ENLACE FSO EM UM SISTEMA SIMPLES

Título: Modelagem de um enlace FSO em um meio turbulento e com desalinhamento

Autores: João Gabriel Porto Silvaes Corrêa, Rafael de Souza Cunha Bessoni, Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro e Maria Thereza M. Rocco Giraldi

Revista: MOMAG 2016

5.1.2 ARTIGO SUBMETIDO SOBRE MODELAGEM DO ENLACE FSO EM UM SISTEMA OCDMA 1D

Título: Simulation of a FSO link using temporal OCDMA under turbulence and misalignment conditions

Autores: João Gabriel Porto Silvaes Corrêa, Rafael de Souza Cunha Bessoni, Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro e Maria Thereza M. Rocco Giraldi

Revista: Microwave and Optical Technology Letters

6. REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, Govind P. **Fiber-optic communication systems**. 3. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2002. 546 p. ISBN 0-471-22144-7.
- ANDREWS, L. C., **Field guide to atmospheric optics**. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2004.
- ANDREWS, L. C., PHILIPS, R. L. **Laser beam propagation through random media**. 2nd ed. SPIE-International Society for Optical Engineering, 2005.
- ANDREWS, L. C. **Special functions of mathematics for engineers, second edition**. Oxford: SPIE Optical Engineering Press, 1997. 275 p. ISBN: 9780819483713.
- ANDREWS, L.C., PHILLIPS, R.L., HOPEN, C.Y., AL-HABASH, M.A. **Theory of optical scintillation**. J. Opt. Soc. Am. A 16, p. 1417-1429, 1999.
- ARNON, S. **Optical wireless communications**. Encyclopedia of Optical Engineering. Beer-Sheva, Ben-Gurion University of Negev: Marcel Dekker, 2003 p. 1866-1886.
- BESSONI, R. de S. C., E SILVA, L. F. S., CARNEIRO, V. G. A., GIRALDI, M. T. M., **A comparison of different modeling approximations for a FSO channel with radial displacement**. Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Porto de Galinhas, PE, Brasil, 2015.
- BLOOM, S. et al. **Understanding the performance of free-space optics**. Journal of Optical Networking, v.2, n. 6, p. 178-200, junho 2003.
- BOUCHET, Olivier et al. **Free-Space Optics: Propagation and Communication**. London: ISTE Ltd, 2006. 219 p. ISBN 1-905209-02-9
- BRZOZOWSKI, Lukasz, SARGENT, Edward H. (Ted). **All-optical analog-to-digital converters, hardlimiters, and logic gates**. Journal of Lightwave Technology, v. 19, n. 1, p. 114-119, janeiro 2001.
- CANOBEAM, DT-150 HD **Specifications** [especificações técnicas online]. 2008. Disponível:
https://www.usa.canon.com/CUSA/assets/app/pdf/free_space_optics/CanobeamChallenge6-17-08.pdf. [capturado em fevereiro 2013].
- CARNEIRO, V. G. A. **CDMA óptico sobre óptica no espaço livre para comunicações móveis em sistemas de defesa**. Tese (Doutor em Ciência em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- CARNEIRO, V. G. A., RODRIGUES, G. K., GIRALDI, M. T. M. R. **Simulation of a temporal hard-limited OCDMA system over FSO link under average turbulence**.

- Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 12, No. SI-2, p. 79-95, 2013.
- CHEN, Jun-Jie, YANG, Guu-Chang. **CDMA fiber-optic systems with optical hard limiters**. Journal of Lightwave Technology, v. 19, n. 7, p. 950-958, julho 2001.
- COELHO, Thiago Vieira Nogueira. **Estudo de Sistemas de Comunicação Utilizando Óptica no Espaço Livre**. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- COLVERO, Claiton P. **Análise experimental de sistemas de comunicações ópticas no espaço livre em diferentes comprimentos de onda**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Científico, 2005.
- CURTIS, F. J. **Retire the wire, fixed wireless**. Network computing, Set. 14, 2005.
- CVI MELLES GRIOT, **Gaussian Beam Optics** [guia técnico online]. 2009. Disponível: <https://www.cvimellesgriot.com/Products/Documents/TechnicalGuide/Gaussian-Beam-Optics>. [capturado em janeiro 2013].
- DIOS, F., RUBIO, J. A., RODRÍGUEZ, A., COMERÓN, A. **Scintillation and beam wander analysis in na optical ground station-satellite uplink**. Appl. Opt.43, 2004, p. 3866-3873.
- DORDOVA, L. WILFERT, O. **Calculation and comparison of turbulence attenuation by diferent methods**. Radioengineering Vol. 19 No. 1, 2010.
- DOS SANTOS, Leandro Basilio. **Análise de sistemas de comunicação utilizando óptica no espaço livre**. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- FANTE, R. L. **Electromagnectic beam propagation in turbulent media**. Proc. IEEE 63, 1669-1692, 1975.
- FLATTÉ, S. M., BRACHER, C., WANG, G. Y. **Probability density functions of irradiance for waves in atmospheric turbulence calculated by numerical simulations**. J. Opt. Soc. Am. A 11, 1994, pp. 2080–2092.
- FRIEDMAN, Greg. **Inventing the light fantastic: Ted Maiman and the world’s first laser**. 2000. Disponível: <http://spie.org/newsroom/technical-articles-archive/oereports/maiman-oer>. [capturado em fevereiro 2016].
- G. B. Hughes, M. Chraibi. **Calculating ellipse overlap areas**. Computing and Visualization in Science, Volume 15, Issue 5, pages 291-301 (2012).
- KIM, Isaac I. et al. **Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication system**. Optical Engineering, v. 37, n. 12, p. 3143-3155, dezembro 1998.

- KOLMOGOROV, A. N. **The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers.** C. R. (Doki) Acad. Sci. U.S.S.R. 30, 1941, pp. 301-305.
- LIGHTPOINTE. Disponível: <http://www.lightpointe.com/free-space-optics-technology-overview.html>. [capturado em fevereiro 2016].
- MAHDY, Ahmed, DEOGUN, Jitender S. **Wireless optical communications: a survey.** Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE Vol. 4, 21/25 Mar. 2004.
- MILLER, W. B., RICKLIN, J. C., ANDREWS, L. C. **Effects of the refractive index spectral model on the irradiance variance of a Gaussian beam.** J. Opt. Soc. A., Vol. 11, No. 10, Outubro 1994.
- OSÓRIO, José Alberto Huanachín. **Simulação e desenvolvimento de um enlace de ‘Free-Space Optics’ no Rio de Janeiro e a relação com a ITU-T G826.** Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- PINTO, Marcos Luiz de Andrade. **Relação empírica da visibilidade com profundidade óptica, concentração de aerossóis e focos de queimadas em Alta Floresta e Cuiabá, em 1993 e 1994.** Dissertação (Mestre em Sensoriamento Remoto) – INPE São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2003.
- POLIAK, J., PEZZEI, P., LEIGEB, WILFER, O. **Analytical expression for FSO link misalignments considering Gaussian beam.** Proc. 8th Network and Optical Communications (NOC), 2013 18th European Conference on and Optical Cabling and Infrastructure (OC&i), 2013, Graz, Austria, pp. 99-104.
- RECOLONS, J., ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R.L. **Analysis of beam wander effects for a horizontal-path propagating Gaussian-beam wave: focused beam case.** Optical Engineering Volume 46, Issue 8, 2007.
- RODRIGUES, Gilberto Kirk, **Estudo da influência atmosférica em um sistema digital com multiplexação em código.** Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. **Fundamentals of photonics, 2nd edition.** Wiley Interscience. March 2007. ISBN: 978-0-471-35832-9.
- SCHWIND JJ. 1980. **Geophysical fluid dynamics for oceanographers.** Prentice-Hall Inc., 307 p.
- TARHUNI, Naser G. **Fiber-optic code division multiple access: multi-class optical orthogonal codes, optical power control and polarization encoding.** Tese (PhD in Science in Technology) – Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Espoo, Finland, 2007.

- TATARSKI, V. I. **The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation**. Israel Program for Scientific Translation, NOAA, Jerusalem, 1971.
- TJONDRONEGORO, P. **Free space optics for fixed wireless broadband**. Seminar on Topics in Communications Engineering. Master of Science in Communications Engineering (MSCE). Munich University of Technology, 2005.
- TRISNO, Sugianto. **Design and analysis of advanced free space optical communication Systems**. Tese (PhD in Electrical and Computer Engineering) – University of Maryland, Dept. Elect. Comp. Eng., Maryland, USA, 2006.
- VETELINO, F. S. et al. **Scintillation: theory vs. experiment**. SPIE Proceedings Vol. 5793, Atmospheric Propagation II, 2005.
- WEICHEL, H. **Laser beam propagation in the atmosphere**. SPIE Optical Engineering Press, pp. 12-66, Bellingham, WA, 1990.
- WILLEBRAND, H. A., GHUMAN, B. **Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks**. Sams Publishing, 2001. 259 p. ISBN 978-0672322488
- YANG, F., CHENG, J., TSIFTISIS, T. A. **Free-space optical communications with generalized pointing errors**. International Conference on Communications (ICC), p. 3943-3947, Budapest, Junho, 2013.
- YOUNG, C. Y., ANDREWS, L. C., ISHIMARU, A. **Time-of-arrival fluctuations of a space-time Gaussian pulse in weak optical turbulence: an analytic solution**. Appl. Opt. vol. 37 no. 33, p. 7655-7660, Optical Society of America, 1998.

7. APÊNDICES

7.1 CÓDIGOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA INTERSEÇÃO ENTRE ÁREAS DE ELIPSES

7.1.1 CÓDIGO PARA IDENTIFICAR OS PONTOS DAS ELIPSES QUE SE INTERCEPTAM

```
%Interseção entre duas elipses, uma delas no centro de referência;
%clear;
%format long e;

%Novas coordenadas do centro da segunda elipse (círculo receptor):
%
h_TR=cos(-phi1)*(h2-h1) - sin(-phi1)*(k2-k1);
k_TR=sin(-phi1)*(h2-h1) + cos(-phi1)*(k2-k1);
phi=phi2-phi1;

%Coeficientes da elipse 2 (circulo) transladada e rotacionada:

AA = 1;
BB = 0;
CC = 1;
DD = -2*h_TR;
EE = -2*k_TR;
FF = h_TR^2 + k_TR^2 -r^2;

%Equação da forma:

const1=(CC -AA*(A1/B1)^2);
const2=(FF + AA*A1^2);

cy(1) = const1^2;
cy(2) = 2*EE*const1;
cy(3) = EE^2 + 2*const1*const2 + (DD*A1/B1)^2;
cy(4) = 2*EE*const2;
cy(5) = const2^2-(DD*A1)^2;

%Agora estão determinados os coeficientes cy;

Raizes=roots(cy);%Retorna os valores de y que satisfazem ambas as elipses.
cr=0; %(ITERADOR do numero de raizes reais)
TOL=2*10^(-8);
%Pegando todas as raizes reais calculadas:
for i=1:size(Raizes,1)
    if abs(imag(Raizes(i)))<TOL
        cr=cr+1;
        y(cr)=real(Raizes(i));
    end
end

%Calculando os pares x y

count=0;
if cr
%Calculando x pela elipse 1, caso haja valores de y válidos:
```

```

x(:,1)=A1*sqrt(1-(y./B1).^2);
x(:,2)=-x(:,1);

for j=1:2
    for i=1:cr
        if imag(x(i,j))<TOL & abs(((x(i,j)-h_TR)/A2).^2 + ((y(i)-
k_TR)/B2).^2-1)<TOL;%5*10^(-9);
            count=count+1;
            p(count,1)=real(x(i,j)); p(count,2)=real(y(i));
        end
    end
end

for i=count:-1:1
    for j=1:i-1
        if abs(p(i,1)-p(j,1))<TOL & abs(p(i,2)-p(j,2))<TOL%%Elimina um
possivel ponto repetido que surge caso y=B1;
            count=count-1;
            p(i,:)=[];
        end
    end
end

end

%A saida será todos os pontos x,y de interseção.
%count dá o número de pares (x,y) existentes

if count ==2
    %Fazer verificaçãoo de tangência
    if p(1,2)>=0
        theta=acos(p(1,1)/A1);
    else
        theta=2*pi -acos(p(1,1)/A1);
    end
    EPSRAD=asin(TOL/sqrt(p(1,1)^2 + p(1,2)^2));
    %EPSRAD=TOL;
    x1=A1*cos(theta+EPSRAD);
    y1=B1*sin(theta+EPSRAD);
    x2=A1*cos(theta-EPSRAD);
    y2=B1*sin(theta-EPSRAD);

    test1=AA*x1^2 + CC*y1^2 + DD*x1 + EE*y1 +FF;%+BB*x1*y1
    test2=AA*x2^2 + CC*y2^2 + DD*x2 + EE*y2 +FF;%+BB*x2*y2

    if test1*test2>0%%Pontos sao tangentes
        run('C:\Users\Gabriel\Desktop\testesim2\ZEROINTPNT')
    else
        %chamar algoritmo de 2 pontos
        run('C:\Users\Gabriel\Desktop\testesim2\TWOINTPNT')
    end

elseif count==3
    %chamar algoritmo de 3 pontos
    run('C:\Users\Gabriel\Desktop\testesim2\THREEINTPNT')
elseif count==4
    %chamar algoritmo de 4 pontos
    run('C:\Users\Gabriel\Desktop\testesim2\FOURINTPNT')

```

```

else
    %chamar algoritmo de area 0
    run('C:\Users\Gabriel\Desktop\testesim2\ZEROINTPNT')
end

```

7.1.2 CÓDIGO PARA O CASO COM 0 OU 1 PONTO DE INTERSEÇÃO ENTRE AS ELIPSES

```

%Identifica a maior elipse e armazena o dado num marcador
mark1=0; mark2=0;
if A1*B1>A2*B2
    mark1=1;
elseif A1*B1<A2*B2
    mark2=1;

end

%Identificador de interseção
if [(h_TR/A1)^2 + (k_TR/B1)^2) < 1] & mark1
    AreaRatio=r^2/(A1*B1);
    %'Usar área da elipse 2 (círculo) dividida pela área total'
elseif [((h1-h2)/A2)^2 + ((k1-k2)/B2)^2) < 1] & mark2
    AreaRatio=1;
else
    AreaRatio=0;    %'interseção = 0'
end

```

7.1.3 CÓDIGO PARA O CASO COM 2 PONTOS DE INTERSEÇÃO ENTRE AS ELIPSES

```

%%Registrando os ângulos
for i=1:count
    if p(i,2)>=0
        theta(i)=acos(p(i,1)/A1);
    else
        theta(i)=2*pi -acos(p(i,1)/A1);
    end
end

%%Fazendo a ordenação dos pontos
[theta,I] = sort(theta);
for i=1:count
    ponto(i,1)=p(I(i),1);
    ponto(i,2)=p(I(i),2);
end

```

```
%%Determinar o sentido para a elipse e para o círculo apenas inverter, com
segurança.
```

```
xmid=A1*cos((theta(1)+theta(2))/2);
ymid=B1*sin((theta(1)+theta(2))/2);
```

```
%test=AA*xmid^2 + CC*ymid^2 + DD*xmid + EE*ymid +FF;
test=((xmid-h_TR)^2 + (ymid-k_TR)^2)/r^2;
```

```
if test>1
    ptemp=theta(1);
    theta(1)=theta(2);
    theta(2)=ptemp;
    ptemp=ponto(1,:);
    ponto(1,:)=ponto(2,:);
    ponto(2,:)=ptemp;
end
```

```
if theta(1)>theta(2)
    theta(1)=theta(1)-2*pi;
end
```

```
%Área do segmento de elipse:
Area=(theta(2)-theta(1))*A1*B1*0.5 + sign(theta(2)-theta(1)-
pi)*abs(ponto(1,1)*ponto(2,2)-ponto(2,1)*ponto(1,2))*0.5;
```

```
%Área do segmento de circunferência
for i=1:count
    if ponto(i,2)>=k_TR
        thetacir(i)=acos((ponto(i,1)-h_TR)/r);
    else
        thetacir(i)=2*pi - acos((ponto(i,1)-h_TR)/r);
    end
end
```

```
%%Invertendo a ordem dos ângulos para a circunferência
ptemp=thetacir(1);
thetacir(1)=thetacir(2);
thetacir(2)=ptemp;
```

```
if thetacir(1)>thetacir(2)
    thetacir(1)=thetacir(1)-2*pi;
end
```

```
D=[h_TR k_TR 1; ponto(1,1) ponto(1,2) 1; ponto(2,1) ponto(2,2) 1];
Areacir=(thetacir(2)-thetacir(1))*r*r*0.5 + sign(thetacir(2)-thetacir(1)-
pi)*abs(det(D))*0.5;
```

```
AreaRatio=(Area+Areacir)/(pi*A1*B1)
```

7.1.4 CÓDIGO PARA O CASO COM 3 PONTOS DE INTERSEÇÃO ENTRE AS ELIPSES

```
%%Registrando os ângulos
for i=1:count
    if p(i,2)>=0
        theta(i)=acos(p(i,1)/A1);
    else
        theta(i)=2*pi -acos(p(i,1)/A1);
    end
end

%%Fazendo verificação de tangência

for i=1:count
    EPSRAD=asin(2*10^(-10)/sqrt(p(i,1)^2 + p(i,2)^2));
    x1=A1*cos(theta(i)+EPSRAD)
    y1=B1*sin(theta(i)+EPSRAD)
    x2=A1*cos(theta(i)-EPSRAD)
    y2=B1*sin(theta(i)-EPSRAD)

    %test1=AA*x1^2 + CC*y1^2 + DD*x1 + EE*y1 +FF
    %test2=AA*x2^2 + CC*y2^2 + DD*x2 + EE*y2 +FF
    test1=(x1-h_TR)^2 + (y1-k_TR)^2-r^2
    test2=(x2-h_TR)^2 + (y2-k_TR)^2-r^2

    if test1*test2>=0
        mark=i
    end
end
theta(mark)=[];
p(mark,:)=[];
count=2;

%%Fazendo a ordenação dos pontos
[theta,I] = sort(theta);
for i=1:count
    ponto(i,1)=p(I(i),1);
    ponto(i,2)=p(I(i),2);
end

%%Determinar o sentido para a elipse e para o círculo apenas inverter, com
segurança.

xmid=A1*cos((theta(1)+theta(2))/2);
ymid=B1*sin((theta(1)+theta(2))/2);

%test=AA*xmid^2 + CC*ymid^2 + DD*xmid + EE*ymid +FF;
test=((xmid-h_TR)^2 + (ymid-k_TR)^2)/r^2;

if test>1
    ptemp=theta(1);
    theta(1)=theta(2);
    theta(2)=ptemp;
end
```

```

    ptemp=ponto(1,:);
    ponto(1,:)=ponto(2,:);
    ponto(2,:)=ptemp;
end

if theta(1)>theta(2)
    theta(1)=theta(1)-2*pi;
end

%%Área do segmento de elipse:
Area=(theta(2)-theta(1))*A1*B1*0.5 + sign(theta(2)-theta(1)-
pi)*abs(ponto(1,1)*ponto(2,2)-ponto(2,1)*ponto(1,2))*0.5;

%%Área do segmento de circunferência
for i=1:count
    if ponto(i,2)>=k_TR
        thetacir(i)=acos((ponto(i,1)-h_TR)/r);
    else
        thetacir(i)=2*pi - acos((ponto(i,1)-h_TR)/r);
    end
end

%%Invertendo a ordem dos ângulos para a circunferência
ptemp=thetacir(1);
thetacir(1)=thetacir(2);
thetacir(2)=ptemp;

if thetacir(1)>thetacir(2)
    thetacir(1)=thetacir(1)-2*pi;
end

D=[h_TR k_TR 1; ponto(1,1) ponto(1,2) 1; ponto(2,1) ponto(2,2) 1];
Areacir=(thetacir(2)-thetacir(1))*r*r*0.5 + sign(thetacir(2)-thetacir(1)-
pi)*abs(det(D))*0.5;

AreaRatio=(Area+Areacir)/(pi*A1*B1)

```

7.1.5 CÓDIGO PARA O CASO COM 4 PONTOS DE INTERSEÇÃO ENTRE AS ELIPSES

```

%%Registrando os ângulos
for i=1:count
    if p(i,2)>=0
        theta(i)=acos(p(i,1)/A1);
    else
        theta(i)=2*pi -acos(p(i,1)/A1);
    end
end

%%Fazendo a ordenação dos pontos
[theta,I] = sort(theta);
for i=1:count

```

```

    ponto(i,1)=p(I(i),1);
    ponto(i,2)=p(I(i),2);
end

%Área do segmento de elipse:
Area1=(theta(2)-theta(1))*A1*B1*0.5 + sign(theta(2)-theta(1)-
pi)*abs(ponto(1,1)*ponto(2,2)-ponto(2,1)*ponto(1,2))*0.5;
Area3=(theta(4)-theta(3))*A1*B1*0.5 + sign(theta(4)-theta(3)-
pi)*abs(ponto(3,1)*ponto(4,2)-ponto(4,1)*ponto(3,2))*0.5;

%Área do segmento de circunferência
%%Definindo os "thetacir"
for i=1:count
    if ponto(i,2)>=k_TR
        thetacir(i)=acos((ponto(i,1)-h_TR)/r);
    else
        thetacir(i)=2*pi - acos((ponto(i,1)-h_TR)/r);
    end
end

D1=[h_TR k_TR 1; ponto(2,1) ponto(2,2) 1; ponto(3,1) ponto(3,2) 1];
D2=[h_TR k_TR 1; ponto(1,1) ponto(1,2) 1; ponto(4,1) ponto(4,2) 1];

if thetacir(4)>thetacir(1)
    thetacir(4)=thetacir(4)-2*pi;
end
Area2=(thetacir(3)-thetacir(2))*r*r*0.5 + sign(thetacir(3)-thetacir(2)-
pi)*abs(det(D1))*0.5;
Area4=(thetacir(1)-thetacir(4))*r*r*0.5 + sign(thetacir(1)-thetacir(4)-
pi)*abs(det(D2))*0.5;
D1=[ponto(1,1) ponto(1,2) 1; ponto(2,1) ponto(2,2) 1; ponto(3,1) ponto(3,2)
1];
D2=[ponto(3,1) ponto(3,2) 1; ponto(4,1) ponto(4,2) 1; ponto(1,1) ponto(1,2)
1];
Area5 = [abs(det(D1))+abs(det(D2))]*0.5;

AreaRatio=(Area1+Area2+Area3+Area4+Area5)/(pi*A1*B1)

```