

# Desempenho de um enlace Óptico por Espaço Livre com desalinhamento e sob turbulência

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

Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil

*jgabrieleng@gmail.com, rafael.bessoni@gmail.com, andrezo@ime.eb.br, mtmrocco@ime.eb.br*

**RESUMO:** A propagação de um feixe óptico através do meio atmosférico em um enlace FSO (Free Space Optics) faz com que o sinal seja exposto a diversos mecanismos de atenuação. São de grande impacto as perdas causadas pela interação entre o feixe óptico transmitido e as partículas de diferentes substâncias presentes na atmosfera, além do efeito da divergência, que reduz a potência óptica detectada no receptor. Porém, para descrever corretamente um canal FSO, é necessário considerar também a influência da turbulência atmosférica, bem como a ocorrência de possíveis desalinhamentos entre transmissor e receptor. Este trabalho contribui com uma proposta de modelagem de canal FSO, considerando os elementos causadores de atenuação do sinal presentes no meio, inclusive a turbulência atmosférica

**PALAVRAS-CHAVE:** Óptica no Espaço Livre, Turbulência Atmosférica, Beam Wander, Beam Spreading, Cintilação.

**ABSTRACT:** The optical beam propagation through the atmospheric media in a FSO link exposes the signal to many attenuation sources. Losses caused by the interaction of the transmitted beam and the particles of different substances on the atmosphere, and also the effect of divergence, which reduce the optical power detected at the receiver, are of great impact. However, in order to properly describe a FSO channel, it is necessary to also consider the influence of atmospheric turbulence and the occurrence of possible misalignments between the transmitter and the receiver. This paper contributes with a FSO channel modeling proposal, taking into account the presence of different elements that attenuates the signal FSO link.

**KEYWORDS:** Free Space Optics, Atmospheric Turbulence, Beam Wander, Beam Spreading, Scintillation.

## 1. INTRODUÇÃO

É chamada de óptica no espaço livre (*Free-Space Optics* – FSO) a tecnologia de comunicação óptica que utiliza o espaço livre como meio de transmissão. Esse sistema possui diversas vantagens em comparação a outros sistemas ópticos de curtas distâncias, como o preço e a agilidade na instalação. Por isto, é considerado uma boa opção para contornar problemas de conexão presentes nas redes locais atuais, como a conexão de última milha [1-3].

A atenuação atmosférica, que resulta da interação do feixe óptico com partículas suspensas na atmosfera, é um fator que causa grandes atenuações ao sinal FSO, ao submeter o canal aos efeitos conhecidos como absorção e espalhamento [1]. Porém, para que um canal FSO seja modelado adequadamente, é necessário que também sejam consideradas as atenuações sofridas pelo sinal devido à turbulência atmosférica e a possíveis desalinhamentos entre os componentes ópticos, causados por ventos ou qualquer movimento na base do transmissor. Neste artigo, a teoria necessária para realizar esta modelagem é fornecida.

Feixes cônicos com distribuição de intensidade uniforme e um algoritmo de interseção de elipses para calcular a área de interseção entre o receptor e o feixe óptico [4], foram considerados neste trabalho. Isto foi assumido ao observar que o feixe gerado por um transmissor circular adquire um formato elíptico ao ser deslocado de seu eixo de alinhamento com o transmissor, também circular. A contribuição deste trabalho foi a modelagem conjunta dos efeitos da turbulência e do desalinhamento ao se propagar em um enlace FSO.

Os trabalhos relacionados ao tema deste trabalho estão apresentados na seção 2. Na seção 3, as expressões utilizadas para modelagem da turbulência, da atenuação atmosférica e da atenuação geométrica no canal óptico são apresentadas. O método para modelagem do canal óptico está descrito na

seção 4. Os resultados e discussões são exibidos na seção 5. Por fim, a seção 6 apresenta as conclusões.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

A teoria que descreve a propagação de um feixe em um meio turbulento e seus efeitos já possuía um extenso desenvolvimento, como mostram os trabalhos de Strohnbahn [5], Tatarski [6] e Fante [7]. Novas pesquisas sobre o tema geraram, ao longo dos anos, resultados mais práticos acerca de cada um dos fenômenos associados à turbulência. Latatis et al. [8] desenvolveu expressões para avaliar o *beam wander*, tanto para feixes focados quanto para feixes colimados. Esta análise foi estendida posteriormente por Dios et al. [9], Andrews et al. [10] e Reolons et al. [11], que obtiveram expressões tanto para o *beam spreading* quanto para o *beam wander*, separadamente. Estes trabalhos também geraram expressões necessárias para determinar o índice de cintilação de um feixe óptico, com ou sem sistema de *tracking* [11].

Três métodos diferentes para realizar o cálculo de forma analítica da média de atenuação causada pela cintilação no feixe óptico foram apresentados por Dordova et al. [12]. Neste trabalho, optou-se por empregar o modelo da aproximação de Rytov.

## 3. ANÁLISE TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os fundamentos teóricos para modelar e calcular as perdas de potência que ocorrem no enlace FSO devido às fontes de atenuação nele presentes.

### 3.1 Alargamento e Beam Wander

Há três fenômenos decorrentes da turbulência que devem

ser considerados ao se analisar um feixe óptico que se propaga em um meio turbulento, mesmo que estes não sejam tão impactantes quanto a cintilação. Estes são o raio do feixe a um curto prazo de exposição (*short term*); raio do feixe a um longo prazo de exposição (*long term*) e o *beam wander*.

A ocorrência do alargamento do feixe a curto prazo em um meio turbulento se dá pois a difração sofrida pelos raios ópticos é maior do que em um meio não-turbulento [13]. Já o efeito do *beam wander* ocorre devido à interação entre as células de turbulência e o feixe óptico, fazendo com que o centroide do feixe seja deslocado de forma aleatória. Os dois efeitos mencionados são relacionados à largura do feixe de longo prazo de exposição de acordo com a expressão [9]:

$$W_{LT}^2(z) = W_{ST}^2(z) + 2(\beta^2), \quad (1)$$

onde  $W$  é o raio do feixe a longo prazo de exposição,  $z$  é a distância de propagação,  $W_{ST}$  é o raio do feixe a curto prazo de exposição e  $\beta$  é o momento de segunda-ordem do deslocamento do feixe. Neste trabalho, a largura do feixe é definida como a largura pela qual a irradiância máxima é reduzida por um fator de  $1/e$ .

Através de (1), verifica-se que o raio de longo prazo de exposição do feixe é, na prática, uma ação conjunta dos efeitos de alargamento a curto prazo e do *beam wander* [9].

Um regime de turbulência em um meio pode ser descrito como possuindo fraca, média ou forte flutuação. Diferentes equações são necessárias para a modelagem dos efeitos no feixe sob cada um destes regimes. O regime de turbulência é considerado de fraca flutuação quando [10]:

$$\sigma_R^2 < 1, \quad (2)$$

onde  $\sigma_R^2$  é a variância de Rytov, parâmetro usado na descrição da intensidade da turbulência em um meio, e é dado por [8]:

$$\sigma_R^2 = 1,2,3C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (3)$$

onde  $C_n^2$  é o parâmetro estrutural do índice de refração, cujo valor varia ao longo do dia, sendo mais elevado durante os horários com maior incidência solar, e pode ser medido em um determinado local usando-se um cintilômetro [14],  $L$  é a distância do enlace,  $k$  é o número de onda óptico,  $l$  é o comprimento de onda. Portanto, observa-se que a variância de Rytov é um parâmetro dependente do comprimento de onda empregado na transmissão.

Em um regime de fracas flutuações e para feixes colimados, o raio do feixe a um longo prazo de exposição é dado por [10]:

$$W_{LT} = W \left[ 1 + 1,33\sigma_R^2 \left( \frac{2L}{kW^2} \right)^{5/6} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

onde  $W$  é o raio do feixe limitado pela difração no plano de recepção, dado por [10]:

$$W = W_0 \left[ \left( 1 - \frac{L}{F_0} \right)^2 + \left( \frac{2L}{kW_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

onde  $W_0$  é o raio do feixe no plano do transmissor e  $F_0$  é o foco geométrico do feixe, ou raio de curvatura de fase frontal. O Porém, ao considerar um meio sob regime de forte flu-

tução, o raio do feixe a longo prazo de exposição é dado por [10]:

$$W_{LT} = W \left[ 1 + 1,63\sigma_R^{12/5} \Lambda \right]^{1/2}, \quad (6)$$

onde  $\Lambda$  é a razão de Fresnel do feixe no plano de recepção, definida por [11]:

$$\Lambda = \frac{2L}{kW^2}, \quad (7)$$

### 3.2 CINTILAÇÃO

A cintilação é o principal fenômeno causado pela turbulência a ser considerado em um enlace FSO. Ao se propagar em um meio turbulento, o feixe óptico se depara com flutuações no índice de refração em seu caminho, que irão gerar variações temporais ou espaciais na irradiância da onda [1]. O índice de cintilação usado neste trabalho é dado por [12]:

$$\sigma_I^2 = 2,3,17C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (8)$$

Por tratar-se de um fenômeno que afeta a irradiância do feixe de modo aleatório, geralmente opta-se por uma abordagem probabilística para a sua análise em um determinado meio de propagação [9-10], [18]. Neste artigo, a aproximação de Rytov [12] 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 relacionada à cintilação é dada por [dB], ou seja:

$$\alpha_{CINT} = 2 \sqrt{2,3,17C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}} \quad (9)$$

### 3.3 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

O feixe propagante sofre atenuação ao interagir com os diversos tipos de partículas de substâncias diferentes e aerossóis presentes na atmosfera. Podem ser citados dois efeitos degradantes para o sinal, advindos desta interação: a absorção e o espalhamento. Considerando estes dois efeitos, o coeficiente de atenuação atmosférica, em  $\text{km}^{-1}$  é dado por [1]:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a, \quad (10)$$

onde  $\alpha_m$  e  $\alpha_a$  são os coeficientes de absorção molecular e por aerossóis, respectivamente,  $\beta_m$  e  $\beta_a$  são os coeficientes de espalhamento molecular e por aerossóis, respectivamente. O coeficiente de atenuação atmosférica ( $\alpha_{ATM}$ ), em dB/km, é a razão entre a potência óptica após a propagação do feixe óptico na atmosfera por uma distância  $L$  ( $P_L$ ), e a potência óptica inicial ( $P_S$ ), e é dado por [16]:

$$\alpha_{ATM} = -\frac{10}{L} \log \left( \frac{P_L}{P_S} \right), \quad \frac{P_L}{P_S} = \exp(-\gamma \cdot L) \quad (11)$$

### 3.4 Atenuação Geométrica

De acordo com o modelo de distribuição uniforme utilizado para descrever a intensidade óptica do feixe, este

assume a forma de um cone ao se propagar. Em condições de alinhamento perfeito, a atenuação geométrica é definida como [17]:

$$\alpha_{geom} = \begin{cases} \frac{d_R^2}{(d_T + \theta L)^2}, & \text{se } d_R < d_T + \theta L \\ 1, & \text{se } d_R \geq d_T + \theta L \end{cases}, \quad (12)$$

Onde  $d_R$  é o diâmetro do receptor,  $d_T$  é o diâmetro do transmissor,  $\theta$  é o ângulo de divergência e  $L$  é o comprimento do enlace.

Porém, havendo uma rotação no eixo do transmissor, o feixe assume a forma de uma elipse, e por isso o cálculo da atenuação geométrica ganha uma maior complexidade.

Portanto, para se obter a atenuação geométrica, descrita pela razão entre as áreas do feixe e do receptor, um algoritmo que calcula a área de interseção de elipses [4] foi implementado. Dada uma possível variação de posição nos eixos  $x$  e  $y$  do transmissor, ou uma variação nos ângulos de elevação ou azimute deste, o algoritmo também calcula a posição do feixe, identifica se há ou não uma interseção entre a área do feixe e do receptor e o número de pontos de interseção, para então calcular a razão entre estas áreas.

### 3.5 POTÊNCIA RECEBIDA

Para se calcular a potência recebida em um enlace FSO, utiliza-se a seguinte equação [18]:

$$\frac{P_R}{P_S} = \alpha_{GEO} 10^{-(\alpha_{ATM} \cdot L + \alpha_T + \alpha_R + \alpha_{CINT} + \alpha_{ADD})/10}, \quad (13)$$

onde  $P_R$  é a potência detectada na entrada do receptor FSO,  $P_S$  é a potência transmitida na saída do transmissor FSO,  $\alpha_{GEO}$  é a atenuação geométrica no enlace,  $\alpha_{ATM}$  é a atenuação atmosférica,  $\alpha_T$  e  $\alpha_R$  são, respectivamente, as perdas de inserção no transmissor e no receptor devido às eficiências de acoplamento entre fibra e telescópio,  $\alpha_{CINT}$  é a atenuação por cintilação e  $\alpha_{ADD}$  representa possíveis perdas adicionais.

### 4. SIMULAÇÃO DO ENLACE FSO

Neste trabalho, foi realizada a simulação de um enlace FSO considerando um feixe cônico, de distribuição de intensidade constante e com muito maior que o comprimento do enlace ( $F_\theta$ ). Para a simulação, foi utilizado o *software* OptiSystem, da empresa Optiwave, Inc.

Foi implementado um circuito composto de um laser trans-

missor (bloco da esquerda), um receptor óptico (bloco da direita) e um bloco que integra o programa OptiSystem com o *software* MATLAB. Através deste bloco, códigos que simulam o meio de propagação e possíveis desalinhamentos no laser transmissor são incluídos. Para as simulações, foi considerado que tanto o transmissor quanto o receptor óptico utilizados possuem 3 dB de perda de inserção e 10 cm de diâmetro.

A Fig. 1 ilustra o circuito implementado no software para realizar as simulações.

Os resultados de BER utilizados para avaliar a performance dos enlaces propostos neste artigo foram obtidos através de um componente analisador de BER, também fornecido pelo programa OptiSystem.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são avaliados e discutidos os resultados de desempenho obtidos através da simulação de enlaces FSO sob diferentes configurações. A atenuação total no feixe provocada pelo meio de propagação foi calculada através da Eq. (13). Também foi feita a comparação de desempenho entre enlaces que consideram meios turbulentos e não-turbulentos. Todas as simulações feitas consideram um laser transmitindo 5 dBm de potência óptica, com exceção dos resultados mostrados nas FIG. 12, 13 e 14, onde a potência óptica transmitida foi de 15 dBm. Em todos os casos, o comprimento de onda utilizado na transmissão foi de 1550 nm e um diodo PIN com sensibilidade de -31,93 dBm foi utilizado como receptor. As simulações de meios turbulentos consideram turbulência moderada ( $C^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ), ou seja, simulam o início da manhã ou início da noite.

### 5.1 Resultados com Variação do Comprimento do Enlace

Primeiramente, foi avaliado o desempenho de um enlace FSO com perfeito alinhamento entre transmissor e receptor. Conforme o comprimento do enlace aumenta, maior é o impacto da atenuação atmosférica e da divergência no feixe, o que aumenta a atenuação geométrica. Nestas condições e sem turbulência, verificou-se que a BER máxima permitida para o funcionamento do enlace (ou seja, de  $10^{-9}$ ) foi obtida quando o enlace possui 3 km de comprimento, como mostra a Fig. 2. Porém, ao considerar que o meio atmosférico possui uma turbulência moderada, os efeitos desta sobre o feixe reduzem o comprimento máximo possível deste enlace para 2,66 km como é observado na Fig. 3. Em ambos os casos, foi considerado um coeficiente de atenuação atmosférica igual a 9 dB/km.

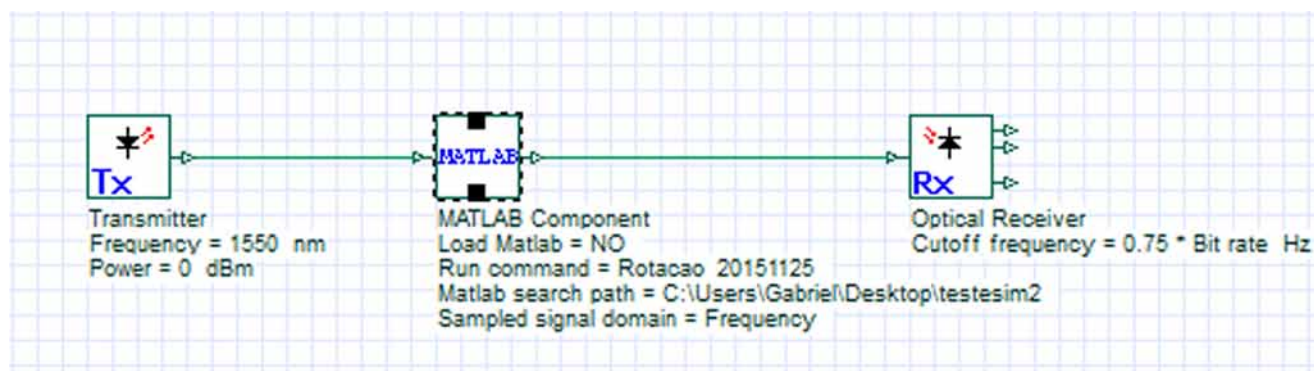


Fig 1: Circuito do enlace FSO no programa OptiSystem

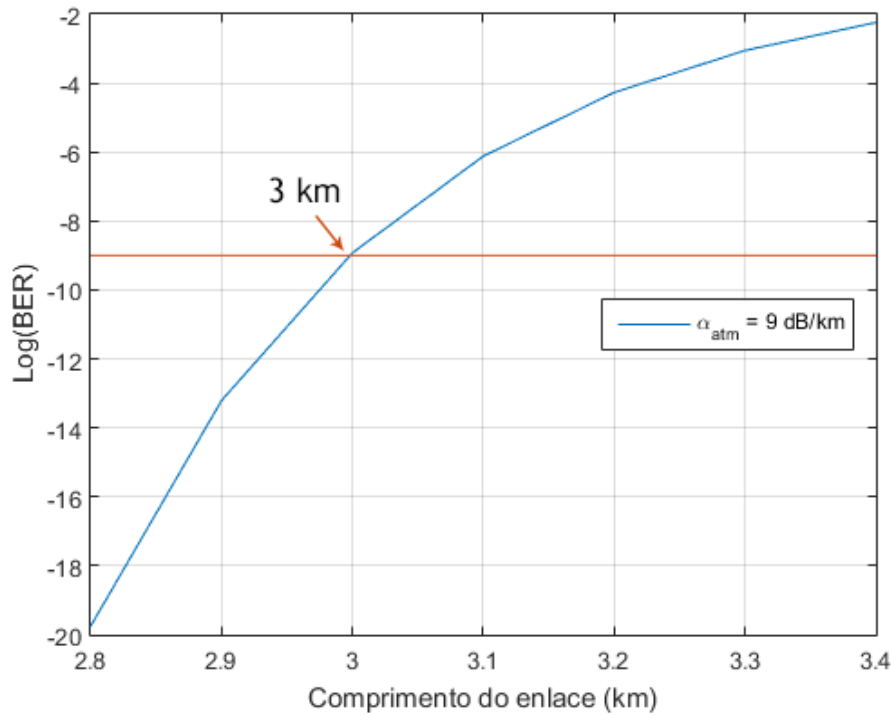


Fig 2: BER em função do comprimento do enlace sem turbulência.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

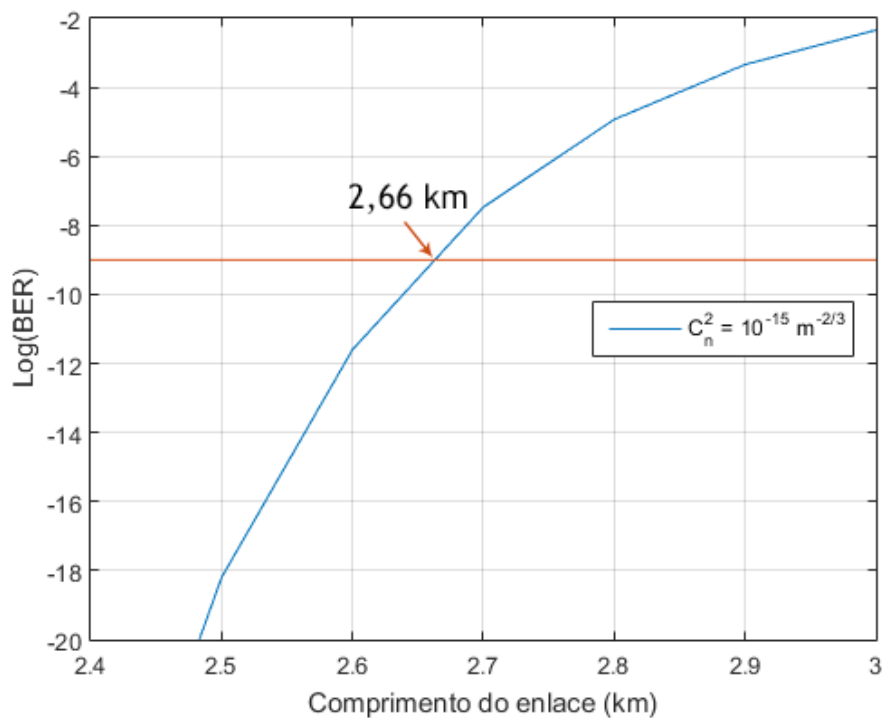


Fig 3: BER em função do comprimento do enlace em meio com turbulência moderada.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$

## 5.2 Resultados com Desalinhamento Axial no Transmissor

Ao realizar simulações de um enlace FSO considerando também diferentes valores de deslocamento axial, foram obtidos os resultados de BER para cada caso, indicando o comprimento máximo possível para o enlace, similarmente à simulação anterior. O mesmo valor de coeficiente de atenuação atmosférica da simulação anterior ( $\alpha_{ATM} = 9\text{ dB/km}$ ) foi

considerado. Neste caso, foi observado que, quanto maior o deslocamento axial do transmissor, maior será a atenuação geométrica resultante e, conseqüentemente, maior será a atenuação na potência detectada pelo receptor, o que acarreta em um aumento na BER.

Para o caso com meio não turbulento como mostrado na Fig. 4, um deslocamento axial igual a 4 cm faz com que o comprimento máximo do enlace seja de 2,77 km.

Ao considerar uma turbulência moderada, a distância

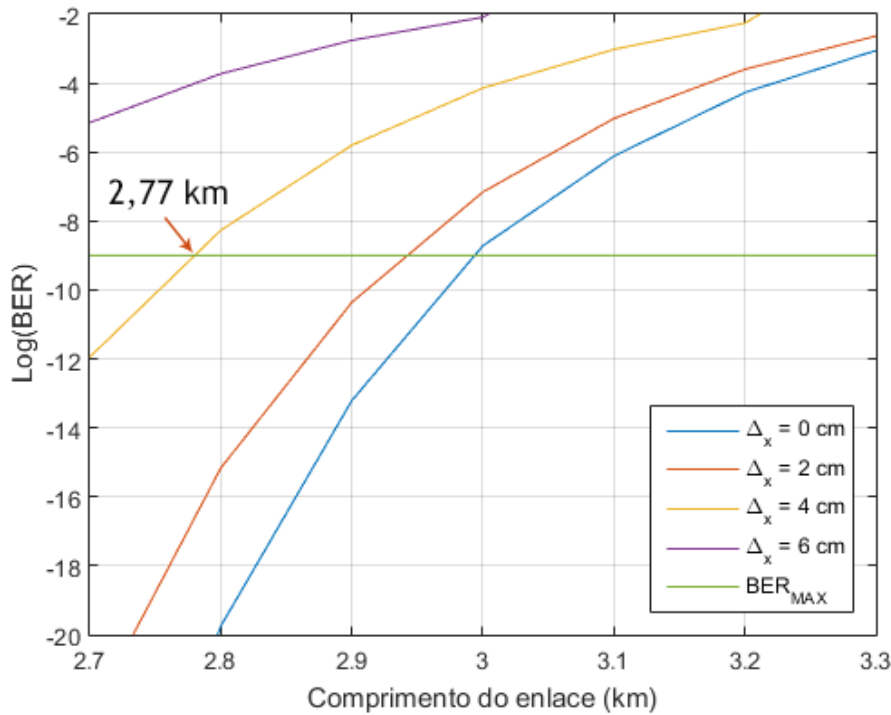


Fig 4: BER em função do comprimento do enlace com diferentes valores de desalinhamento axial e sem turbulência.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

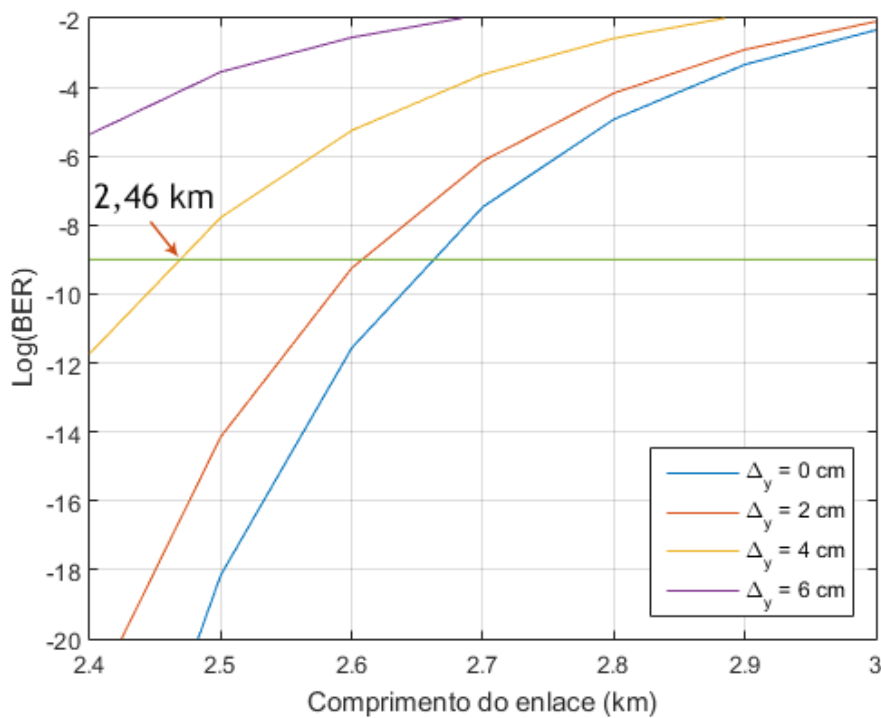


Fig 5: BER em função do comprimento do enlace com diferentes valores de desalinhamento axial em meio com turbulência moderada.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

máxima permitida para este enlace é reduzida para 2,46 km, como ilustrado na Fig. 5.

Pode-se observar que os resultados da Fig. 4 consideram deslocamentos axiais no eixo  $x$ , enquanto os resultados da Fig. 5 consideram que o deslocamento ocorreu no eixo  $y$ . No entanto, como as áreas do transmissor e do receptor são circulares, um deslocamento em apenas um dos eixos acarreta no mesmo valor de atenuação geométrica resultante.

Em uma nova simulação, um desalinhamento de 3 cm nos eixos  $x$  e  $y$  do transmissor, simultaneamente, foi considerado. O meio não possui turbulência. Neste caso, a BER máxima é atingida quando o enlace possui 2,76 km de comprimento, como mostra a Fig. 6. Já para o caso da Fig. 7, onde uma turbulência moderada está presente no canal de propagação, esta BER máxima é obtida quando o comprimento do enlace é igual a 2,45 km.

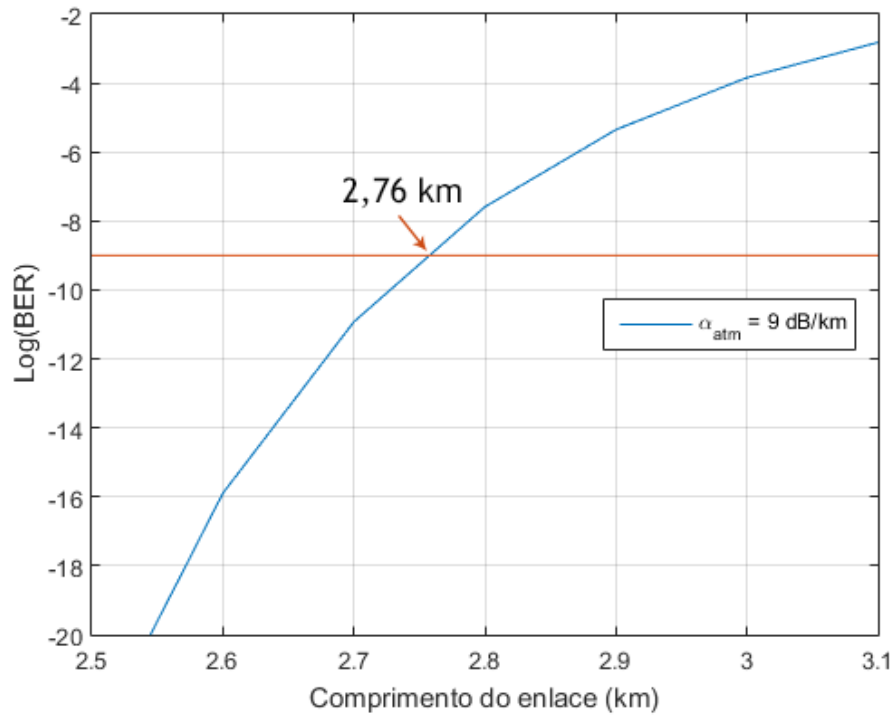


Fig 6: BER em função do comprimento do enlace com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y e sem turbulência.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

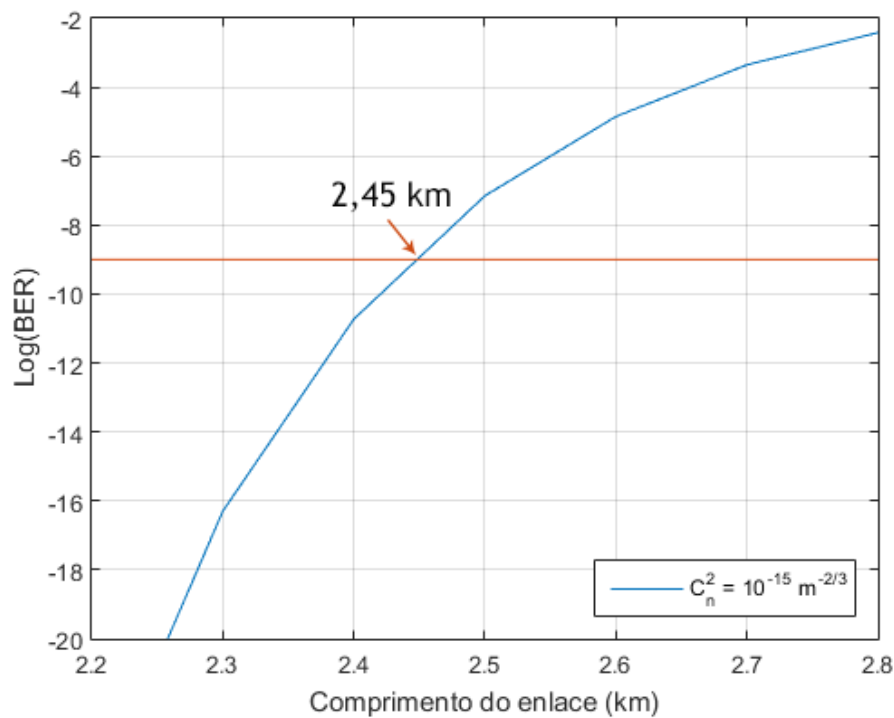


Figura 7: BER em função do comprimento do enlace com desalinhamento de 3 cm nos eixos x e y e em meio com turbulência moderada.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

### 5.3 RESULTADOS COM VARIAÇÃO ANGULAR NO TRANSMISSOR

Uma simulação que considerou uma variação angular de 0,05 mrad no ângulo de azimute do transmissor foi realizada, cujos resultados de potência recebida foram avaliados para três diferentes coeficientes de atenuação atmosférica: 1, 6 e 9 dB/km. Estes valores são equivalentes a meios com tempo claro, com chuva fraca e com névoa fraca, respectivamente.

O resultado obtido mostra que, quanto maior o comprimento do enlace, maior é o impacto da variação angular na atenuação atmosférica, causando grande atenuação até mesmo ao considerar o tempo claro.

Ao considerar o meio com atenuação atmosférica igual a 9 dB/km, foi realizada a simulação para verificar a potência recebida considerando três níveis diferentes de turbulência:  $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  e  $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ , como é observado na Fig. 9.

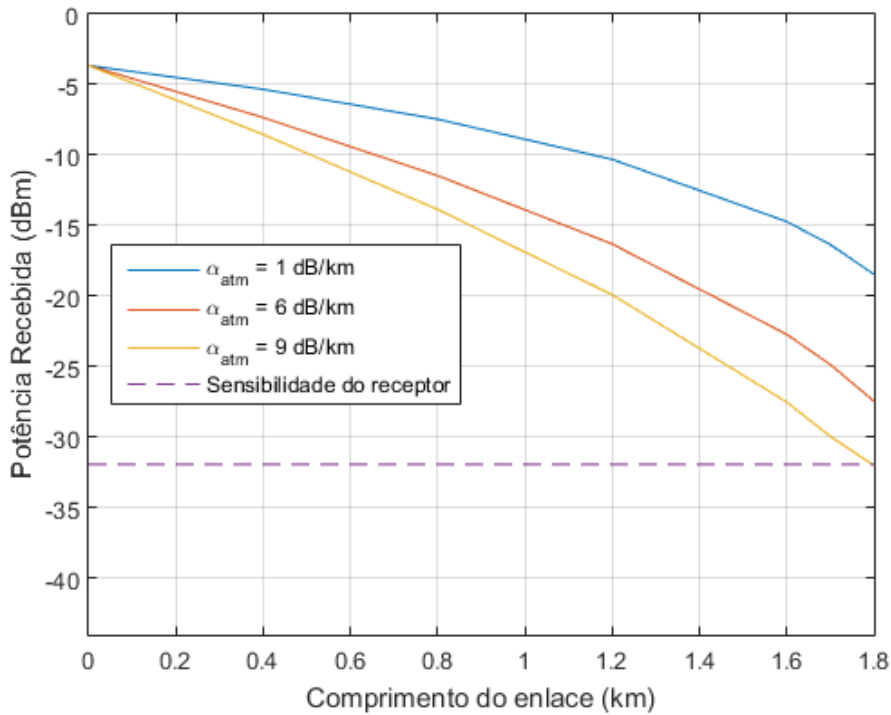


Fig 8: Potência recebida em função do comprimento do enlace com desalinhamento angular de 0,05 mrad e sem turbulência.

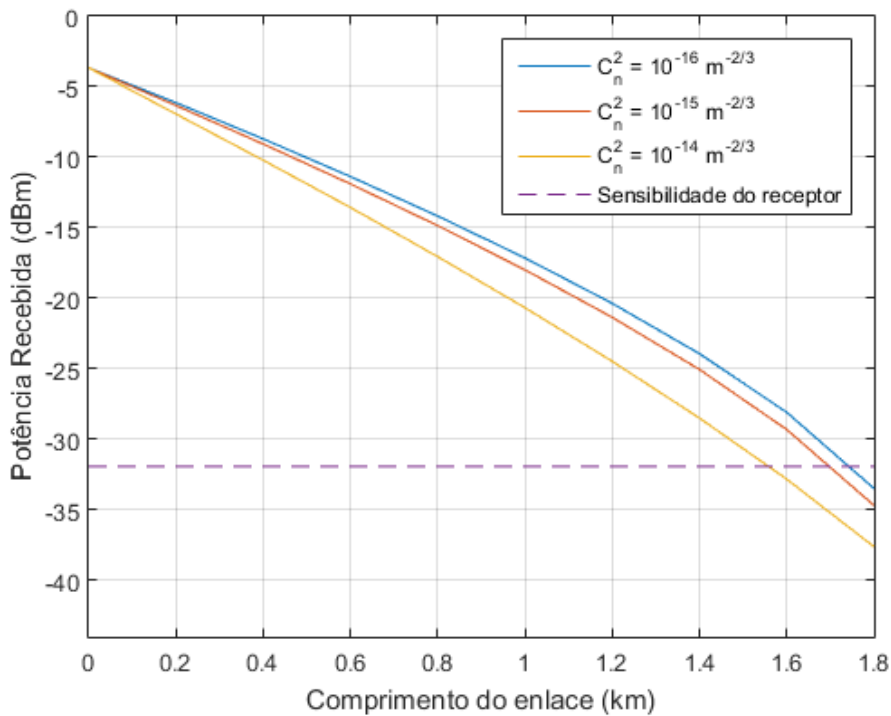


Fig 9: Potência recebida em função do comprimento do enlace com desalinhamento angular de 0,05 mrad em meio turbulento.  $\alpha_{ATM} = 9$  dB/km.

O resultado mostra que a presença da turbulência no meio reduz ainda mais o nível de potência recebida, sendo a atenuação resultante maior conforme o aumento do nível da turbulência.

A Fig. 10 mostra o resultado de BER para a curva de  $\alpha = 9$  dB/km do enlace com desalinhamento angular de 0,05 mrad e sem turbulência, mostrando que o comprimento máximo do enlace com esta variação angular é de 1,77 km. Ao considerar também uma turbulência moderada, este comprimento

máximo cai para 1,71 km, como mostra a Fig. 11.

Em uma outra simulação, ao considerar uma potência transmitida de 15 dBm, atenuação atmosférica de 9 dB/km e com um deslocamento de variação simultânea de 4 cm no eixo y, 0,02 mrad no ângulo de elevação e 0,02 mrad no ângulo de azimute em um enlace de 2 km, foram obtidos os diagramas de olho resultantes, de modo a avaliar o funcionamento do sistema. Ao considerar um meio com  $\alpha = 0,05$  (turbulência fraca), o diagrama de olho encontra-se bem aberto, como

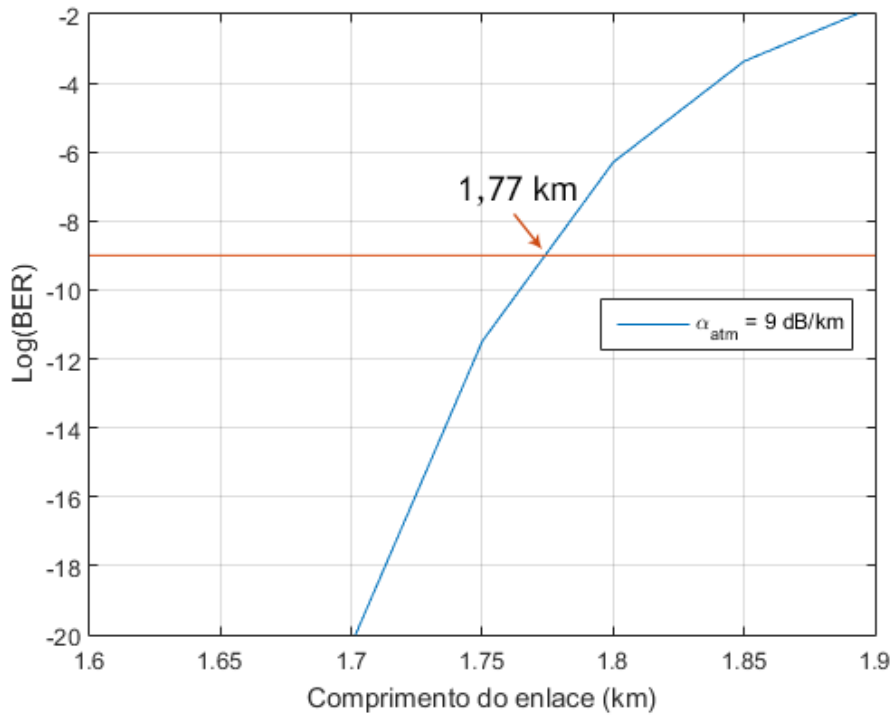


Fig 10: BER em função do comprimento do enlace com desalinhamento angular de 0,05 mrad e sem turbulência.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

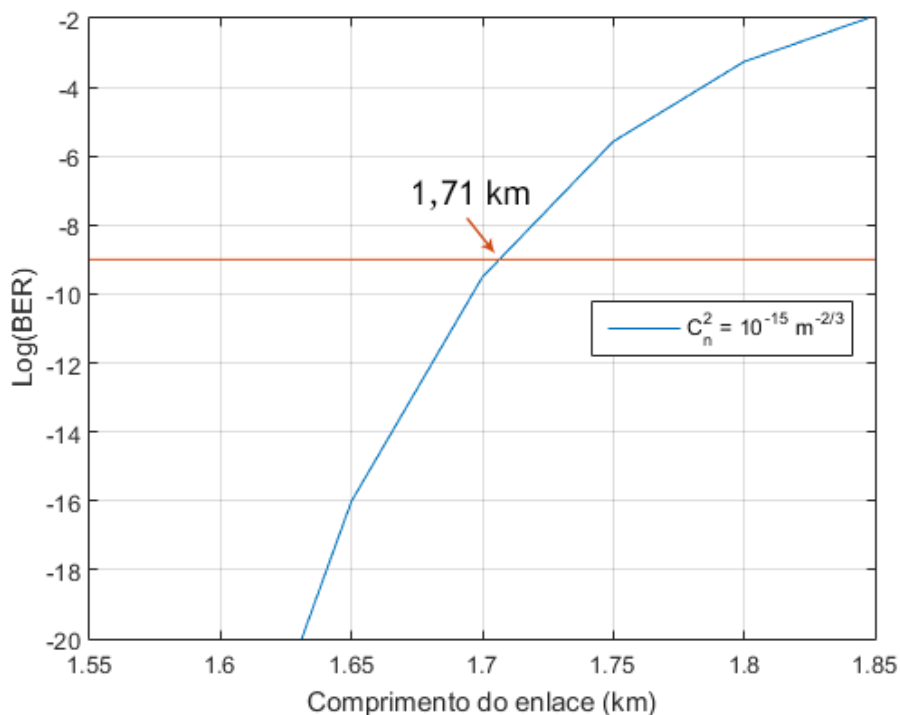


Fig 11: BER em função do comprimento do enlace com desalinhamento angular de 0,05 mrad em meio com turbulência moderada.  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ .

pode ser visto na Fig. 12. Além disso, o sistema apresenta um fator Q acima de 11, o que garante que a BER é menor do que 10<sup>-12</sup>, ou seja, que o sistema funciona de forma bastante adequada.

Ao aumentar a turbulência no meio para  $C_n^2 = 0,5$  (turbulência moderada), o diagrama de olho se encontra um pouco menos aberto, como mostra a Fig. 13. No entanto, o fator Q observado encontra-se próximo a 9, mostrando que o sistema ainda se encontra bem operacional.

Porém, aumentando-se a turbulência e considerando  $C_n^2 =$

1,5 (turbulência forte), o diagrama de olho se encontra bem mais fechado e ruidoso. Além disto, o fator Q observado será inferior a 6, o que mostra que o aumento no nível da turbulência impossibilitará o funcionamento deste enlace. Este resultado pode ser observado na Fig. 14.

## 6. CONCLUSÃO

A partir da simulação de um enlace FSO proposto neste trabalho, baseada na teoria de modelagem do canal óptico



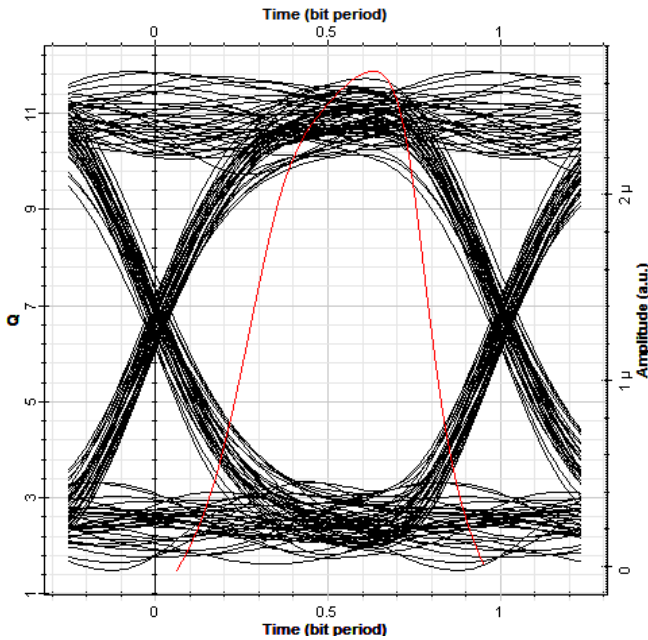


Fig 12: Diagrama de olho do sistema sob turbulência fraca, desalinhamento angular de 0,05 mrad,  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ ,  $\Delta y = 4$  cm e  $L = 2$  km.

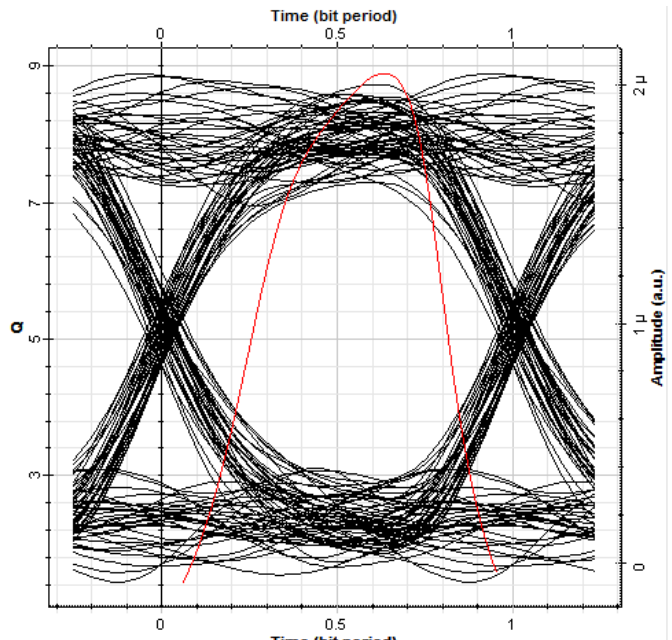


Fig 13: Diagrama de olho do sistema sob turbulência moderada desalinhamento angular de 0,05 mrad,  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ ,  $\Delta y = 4$  cm e  $L = 2$  km.

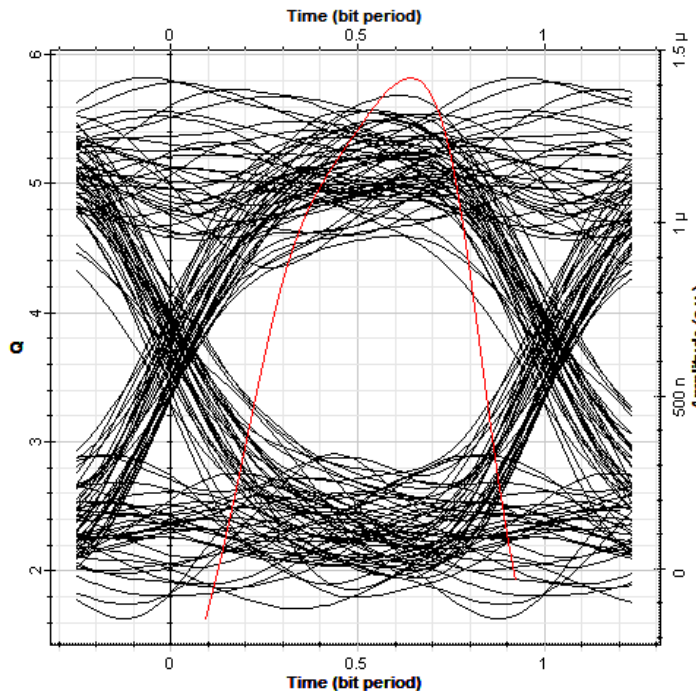


Fig 14: Diagrama de olho do sistema sob turbulência moderada desalinhamento angular de 0,05 mrad,  $\alpha_{ATM} = 9\text{dB/km}$ ,  $\Delta y = 4$  cm e  $L = 2$  km.

apresentada, foram obtidos resultados que permitiram avaliar o desempenho de um canal FSO com diferentes características e configurações do transmissor, do receptor e do meio de propagação.

Através dos resultados, foi possível verificar a crescente atenuação causada no feixe devido aos efeitos da atenuação atmosférica e da divergência. Contudo, os resultados também deixam evidentes as limitações decorrentes da turbulência atmosféricas e da presença de desalinhamentos no sistema, que podem ser causados pela ação do vento e do movimento da base do transmissor, por exemplo.

Em um sistema com os componentes ópticos perfeita-

mente alinhados, a presença da turbulência atmosférica reduz o comprimento máximo do enlace em 340 m. Quando há também um deslocamento axial de 4 cm, este comprimento máximo é reduzido em 540 m. Já no caso da ocorrência de uma variação angular de 0,05 mrad, a redução do comprimento máximo do enlace será de 1,29 km.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, a FAPERJ, a CAPES e ao Exército Brasileiro, pelo suporte financeiro parcial a este trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. A. Willebrand, B. Ghuman, "Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks". Sams Publishing, 2001.
- [2] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. de Fornel, P.N. Favenmec. "Free-Space Optics, Propagation and Communication". ISTE: London, 266.
- [3] E. Leitgeb, M. Gebhart, and U. Birnbacher. "Optical networks, last mile access and applications". Journal of Optical Fiber and Communications Reports 2, 56-85 (2005). Springer Science+Business Media Inc.
- [4] G. B. Hughes, M. Chraibi, "Calculating ellipse overlap areas", Computing and Visualization in Science, Volume 15, Issue 5, pages 291-301 (2012).
- [5] J. W. Strohnehn, "Line-of-sight wave propagation through the turbulent atmosphere", Proc. IEEE 56, 1301-1318 (1968).
- [6] V. I. Tatarski, "The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation", Israel Program for Scientific Translation, NOAA, Jerusalem, 1971.
- [7] R. L. Fante "Electromagnetic beam propagation in turbulent media", Proc. IEEE 63, 1669-1692 (1975).
- [8] J. H. Churnside and R. J. Lataitis "Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere", Appl. Opt. 29, 926-930 (1990).
- [9] F. Dios, J. A. Rubio, A. Rodríguez, and A. Comerón, "Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink", Appl. Opt. 43, 3866-3873 (2004).
- [10] L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation through Random Media", 2nd ed., SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (2005).
- [11] J. Recolons, L. C. Andrews, R. L. Phillips, "Analysis of beam wander effects for a horizontal-path propagating Gaussian-beam wave: focused beam case", Optical Engineering Volume 46, Issue 8 (2007).
- [12] L. Dordova, O. Wilfert, "Calculation and comparison of turbulence attenuation by different methods", Radioengineering Vol. 19. No. 1 (2010).
- [13] L. C. Andrews, "Field guide to atmospheric optics", SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (2004).
- [14] J. A. H. Osorio, "Simulação e desenvolvimento de um enlace de 'Free-Space Optics' no Rio de Janeiro e a Relação com a ITU-T G826" (Dissertação), PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2005).
- [15] G. K. Rodrigues, "Estudo da influência atmosférica em um sistema digital com multiplexação em código" (Dissertação), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2012).
- [16] I. I. Kim, M. Bruce, E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications", Proceedings of SPIE, v. 4214, p. 26-37, 2001.
- [17] R. de S. C. Bessoni, L. F. S. e Silva, V. G. A. Carneiro, and M. T. M. Giraldi, "A comparison of different modeling approximations for a FSO channel with radial displacement", Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International, pp. 1-5, 2015.
- [18] S. Bloom et al., "Understanding the performance of free-space optics", Journal of Optical Networking, v.2, n.6, p. 178-200, junho 2003.