

2. Parâmetros e Balanço de Potência do FSO

A necessidade de sistemas de alta velocidade em redes metropolitanas e enlaces relativamente longos (acima de 1 km) tem aumentado nos últimos anos. Atualmente, a largura de banda solicitada atinge taxas de 10, 100 Mbps ou mais. Por outro lado, a fibra óptica pode resolver este problema, porém, sua aplicação é limitada pelo alto custo na sua instalação [19]. Muitos sistemas comerciais de FSO usam os comprimentos de onda compreendidos entre 780 nm e 1550 nm, pois nesta faixa há um leque de alternativas de baixo custo para a construção, implementação e instalação. Isto permite com que os sistemas FSO sejam utilizados em conjunto com os anéis de fibras ópticas na transmissão de dados; principalmente no comprimento de onda de 1550nm.

Neste capítulo a potência no transmissor e no receptor são consideradas, além das perdas atmosféricas, geométricas e da cintilação. Adicionalmente, será colocada uma margem de segurança, para manter a comunicação entre o transmissor e receptor, e assim evitar os desvanecimentos no enlace. Finalizando o capítulo, será apresentado o cálculo do balanço de potência do FSO, sendo que, cada parâmetro estará expresso em dB, determinando a perda total do enlace. O procedimento é similar aos cálculos realizados nos enlace de microondas.

2.1 Transmissor e Receptor

Os sistemas de comunicação por laser possuem um comprimento de onda de aproximadamente 1 μm ou menos. Devido às condições atmosféricas, o feixe de laser é atenuado enquanto se propaga no meio, podendo perder a focalização ou se desviar do receptor. Nesse aspecto, o transmissor e o receptor determinam o comprimento de onda a ser utilizado. A potência emitida pelo transmissor e a sensibilidade mínima do receptor são definidas como:

P_{TX} = Potência emitida do transmissor [dBm].

P_{RX} = Potência captada pelo receptor, a uma distancia R [dBm].

A Figura 2.1 apresenta um modelo de um transmissor-receptor de FSO da

LightPointe, sendo conhecido como cabeçote de FSO, indicando as diversas partes do aparelho. O cabeçote de FSO pode transmitir como receber um feixe do laser coletando a energia recebida por meio de uma lente óptica (3) e concentrá-la num pequeno receptor fotodiodo (10). Este sinal por sua vez é amplificado. Alguns sistemas FSO possuem sistemas de múltiplos feixes, permitindo ao cabeçote transmissor enviar sinais com diversidade de espaço e frequência com maior probabilidade de ser corretamente detectado mesmo na presença de nevoeiros.[20]

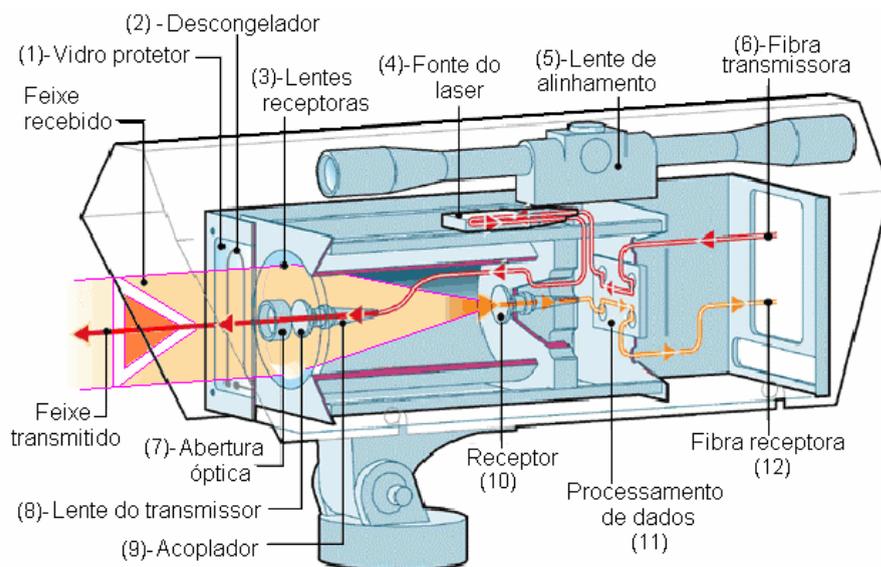


Figura 2.1 – FSO TX – RX da LightPointe

2.2 Perda Atmosférica

2.2.1. Características iniciais

A perda atmosférica é causada por diversos fenômenos que interferem na propagação do feixe de laser na atmosfera. O espalhamento, que é decorrente da presença de partículas suspensas no ar, não é considerado uma perda de energia, e sim como um redirecionamento da luz. Porém, este redirecionamento ou redistribuição da luz leva a uma diminuição da intensidade da luz do laser que vai chegar ao receptor. Alguns espalhamentos vão depender das características da partícula e do comprimento de onda utilizado. Tomando como base estas particularidades, é definido o parâmetro de tamanho x_0 que é um número adimensional [21] :

$$x_0 = 2\pi r / \lambda \quad (2.1)$$

sendo que:

r = raio da partícula.

λ = comprimento de onda.

Os tipos de espalhamentos podem ser classificados de acordo com o valor de x_0 . O espalhamento *Rayleigh* é considerado quando $x_0 \ll 1$; quando $x_0 \sim 1$ o espalhamento é de *Mie*, e em situações em que $x_0 \gg 1$ o espalhamento pode ser achada mediante técnicas da *ótica geométrica*. Desta forma, o espalhamento do feixe será maior em um ambiente com nevoeiro do que em um espaço que esteja chovendo.

Os comprimentos de onda que são utilizados nos sistemas FSO e que se propagam no meio possuem um comprimento radial muito próximo das partículas de nevoeiro, provocando uma dispersão maior do que comparada com as gotas de chuva. O raio das gotas de chuva são um pouco maiores do que λ do feixe, e não apresentam muito obstáculo na propagação do feixe.

O feixe de laser se propaga no meio e atravessa uma partícula de água, a qual criará um diagrama de espalhamento, apresentado na Figura 2.2. A energia que se propaga no meio é dispersa através de lóbulos primários, secundários e reversos. O formato do diagrama de espalhamento dependerá do comprimento de onda, do ângulo de incidência do feixe com a partícula, das reflexões internas do feixe dentro da partícula, do índice de refração e da densidade da partícula.

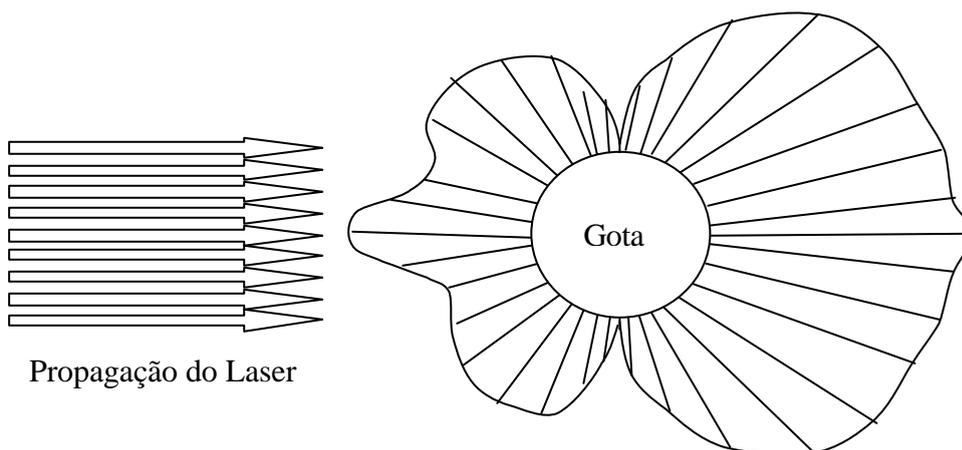


Figura 2.2 - Diagrama de espalhamento provocado por uma partícula de água. O laser propaga-se da esquerda para a direita. O diagrama apresenta lóbulos primários, secundários e reversos

A Figura 2.3 apresenta os diagramas de espalhamento para partículas de água com diferentes raios. Estes diagramas foram obtidos mediante um programa de

simulação oferecido por [22]. As diferenças entre 2.3.a e 2.3.b são quase imperceptíveis, sendo que a intensidade de energia do lóbulo primário é quase do mesmo valor do que do lóbulo reverso. Já na Figura 2.3.c, o diagrama de espalhamento gerado pela partícula de $0.5 \mu\text{m}$ de raio possui um lóbulo primário maior do que o reverso, indicando que esta partícula deixa passar uma grande proporção da energia do laser. Nestes três casos, o comprimento de onda utilizado para a simulação é de 750 nm .

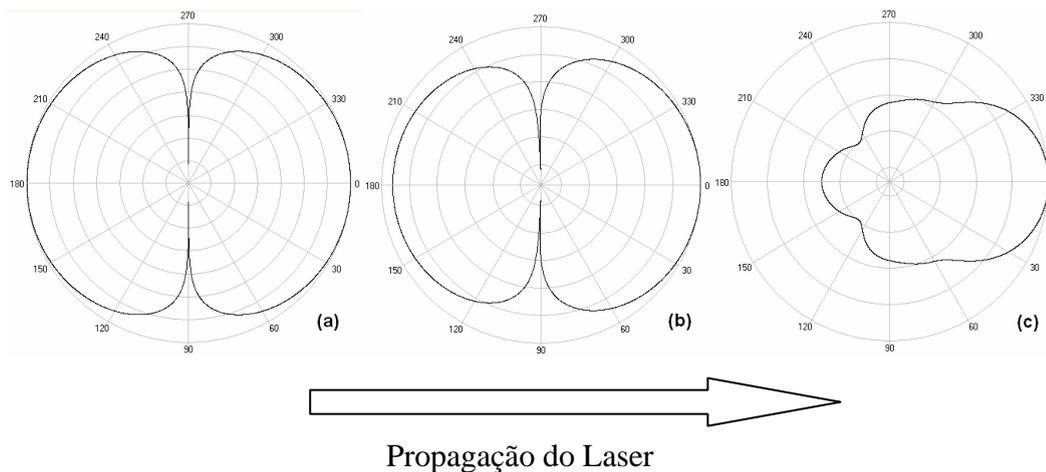


Figura 2.3 - Diagrama de espalhamento Rayleigh (a), Mie (b) e por ótica geométrica (c) para uma partícula de água de 0.02 , 0.12 e $0.5 \mu\text{m}$ de raio respectivamente, no comprimento de onda de 750 nm . O laser propaga-se da esquerda para a direita. A escala logarítmica radial é a intensidade.

Dentro da faixa do comprimento de onda infravermelha, diversas partículas de nevoeiro, fumaça ou poluição contribuem para criar os espalhamentos acima mencionados. A Figura 2.4 apresenta diversas regiões, denominadas janelas atmosféricas, que são as regiões na qual é possível transmitir dados com poucas perdas [23]. Dependendo do I utilizado, será obtida uma determinada taxa de transmitância. A transmitância é a medida, em porcentagem, que determina a capacidade da atmosfera em transmitir a luz. Esta medida possui uma relação direta com o coeficiente de atenuação atmosférica, descrito no item 2.2.2.

É de interesse estudar o comportamento que sofrem os comprimentos de onda situada na faixa de 785 a 1550 nm (região *near infrared*). Nesta região são observadas algumas perdas motivadas pela absorção das partículas de água no ambiente. Estes comprimentos são utilizados na transmissão de dados nos anéis de fibras ópticas, o que possibilitaria a implementação do FSO com as redes ópticas

metropolitanas. Na mesma Figura 2.4 pode se observar outras regiões (*middle infrared* e *far infrared*) que são afetadas por outros elementos e gases atmosféricos (ozônio e dióxido de carbono).

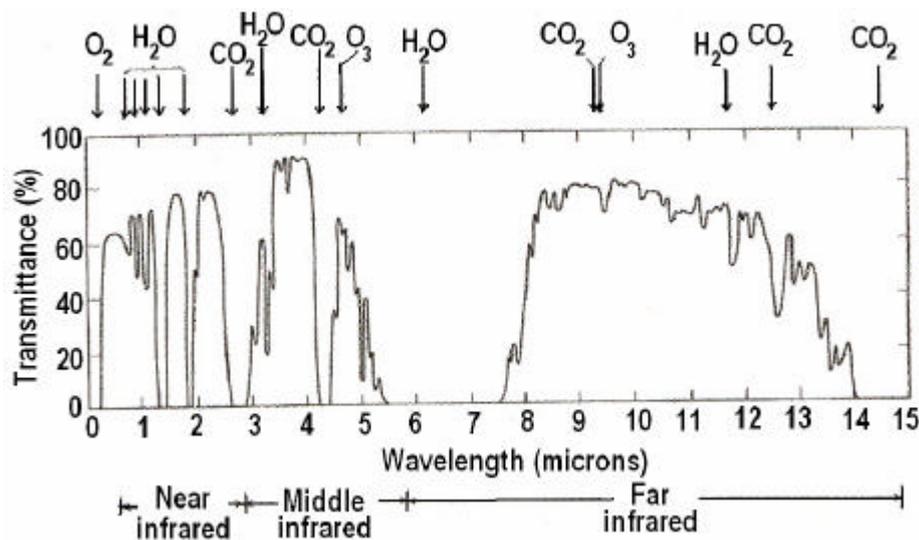


Figura 2.4 – Janelas atmosféricas em vários comprimentos de onda e submetido a vários elementos atenuadores [23].

Para determinar se a atenuação atmosférica depende dos valores de I e do raio da partícula de água suspensa no meio ambiente, mostra-se na Figura 2.5 a relação entre um parâmetro denominado fator da eficiência de espalhamento Q vs. raio de uma partícula de água, obtido pelo programa oferecido em [22].

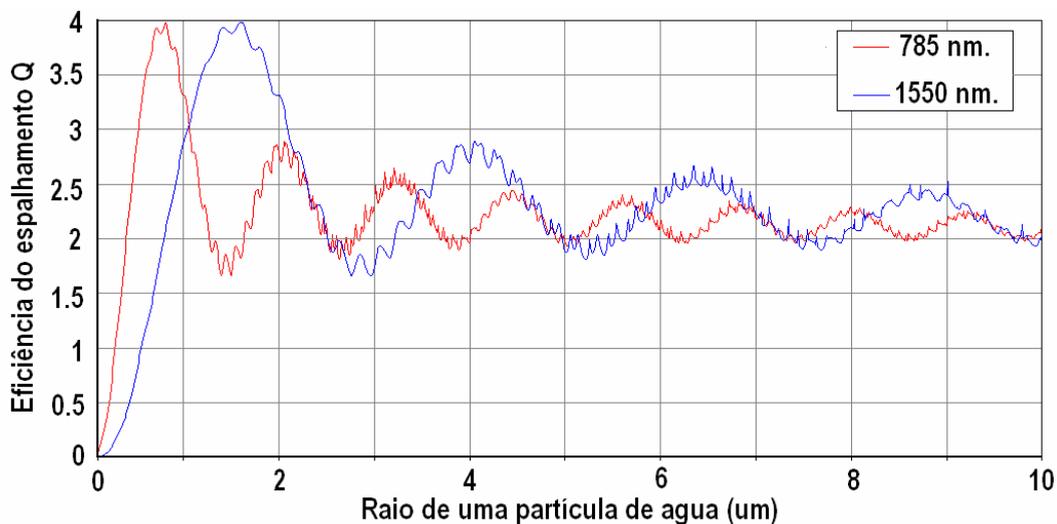


Figura 2.5 - Fator da eficiência do espalhamento vs. raio de uma partícula.

A Figura 2.5 mostra como os diferentes valores dos raios das partículas provocam uma maior eficiência de espalhamento nos comprimentos de 785 e de 1550 nm. Neste caso consideramos que a partícula é de água pura e o valor do

índice de refração n é de 1.33. O fator da eficiência de espalhamento¹ Q é definido em maiores detalhes em [21, 24]

Os maiores valores do fator da eficiência de espalhamento, apresentados na Figura 2.5, acontecerá nos raios das partículas de 0,785 μm e 1,550 μm . As variações foram simuladas com partículas de água, porém, as partículas compostas por poluição ou pelo nevoeiro apresentarão um comportamento diferente.

Conhecendo o valor de Q será possível encontrar o coeficiente de atenuação S indicado na expressão (2.2). Uma distribuição probabilística das partículas de água, presentes no meio, também será necessária. A referência [21] indica que S pode ser calculado somando as contribuições de cada partícula que formam parte da atenuação atmosférica. Deste modo, tem-se que:

$$S = \sum_i n_i Q_i p r_i^2 \quad (2.2)$$

onde:

Q_i = fator da eficiência de espalhamento das partículas, (Figura 2.5.)

r_i = raio das partículas (em μm).

n_i = distribuição ou concentração das partículas existentes no meio.

Este último parâmetro é descrito pela equação 2.3. A distribuição ou a concentração das partículas n_i , que formam parte da atenuação atmosférica, é melhor descrita pela distribuição gama, modificada por Deirmendjian [21]:

$$n(r) = a r^a \exp(-b r^g) \quad (2.3)$$

n = concentração da partícula por unidade de volume por unidade de incremento do raio.

r = raio da partícula.

a, a, b, g constantes reais e positivas, e a é um inteiro.

¹ Um exemplo da eficiência do espalhamento Q é possível ser distinguida pela cor do céu. Sabe-se que a onda que corresponde à cor vermelha tem um maior comprimento de onda e a violeta possui um menor comprimento. A luz do sol, ao atravessar a atmosfera, é espalhada difusamente, pelas partículas do ar. Esse espalhamento depende do comprimento de onda e das dimensões das moléculas que sofrem a colisão com os raios de luz. Entretanto, existe uma afinidade entre a componente azul da luz com o tamanho das moléculas de ar existentes na atmosfera de modo que, o espalhamento sofrido pela onda de luz azul se torna mais acentuado em relação as demais frequências de cores. Essa afinidade é conhecida como ressonância. Tal ressonância faz com que a eficiência da cor azul seja espalhada e se torne aproximadamente 10 vezes maior do que a eficiência do espalhamento da componente vermelha.

Ressalta-se que as partículas consideradas no meio foram água pura ($n = 1.33$).

A Figura 2.6 apresenta a distribuição gama modificada com diversos parâmetros, para determinadas condições atmosféricas, sejam nevoeiro ou neblina. Os gráficos foram obtidos pela equação 2.3. Os valores para a , b , r e r são apresentados na Tabela 2.1 (pagina 14).

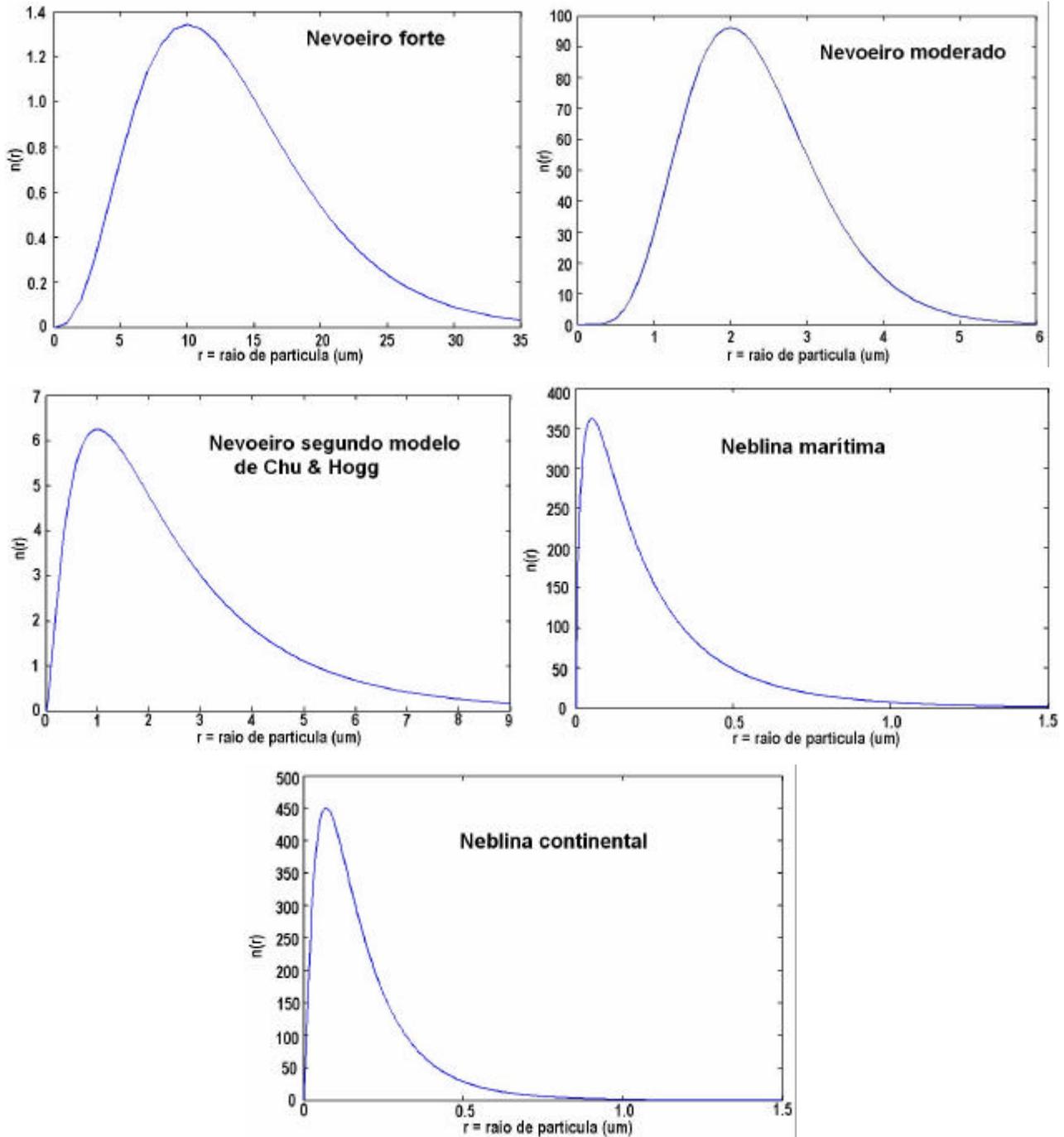


Figura 2.6 - Distribuições de tamanhos de partículas, segundo a Tabela 2.1. Conhecida a distribuição das partículas (eq. 2.3), é possível achar o valor do coeficiente da atenuação segundo a eq. (2.2).

Alguns valores que descrevem a distribuição das partículas podem ser obtidos em [21]:

Tipo de Distribuição	Raio da partícula	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>g</i>	<i>b</i>
Nevoeiro forte	10	0.027	3	1	0.3
Nevoeiro moderado	2	607.5	6	1	3
Nevoeiro (Chu & Hogg)	1	341	2	0.5	4
Neblina marítima	0.05	5.3e4	1	0.5	8.9
Neblina continental	0.07	5.0e-6	2	0.5	15.1

Tabela 2.1 – Parâmetros para alguns tipos de distribuição de partículas, que são utilizados na eq. (2.3). A representação gráfica é mostrada na Figura 2.6.

A função descrita pela eq. (2.3) apresenta um desvanecimento em $r = 0$ e ∞ . Esta distribuição é parecida com a distribuição gama. Estas distribuições de partículas não são constantes no tempo, podendo mudar de uma hora para outra. Porém, a equação (2.3) poderia ser considerada como uma alternativa na possibilidade de encontrar o coeficiente de atenuação da equação (2.2) de uma região na qual não se disponha dos valores de visibilidade. A visibilidade está referenciada ao grau de transparência da atmosfera, ocorrendo desta forma dias ensolarados, porem bastante nebulosos, ou ainda dias encobertos, porem com a atmosfera límpida.

A visibilidade pode ser definida em 3 grupos:

a) Pela Óptica – Determina-se pela capacidade da atmosfera em espalhar ou absorver a luz que esta atravessando-a. As propriedades físicas da atmosfera são descritas pelos coeficientes de extinção, espalhamento e absorção. As características ópticas integram os efeitos dos aerosols e dos gases atmosféricos.

b) Pelo cenário – É definida pela aparência de uma cena quando é visualizado através da atmosfera. Este tipo de visibilidade inclui um alcance visual, contraste, cor, textura, claridade e outros termos descritivos. Algumas modificações acontecem pela iluminação e pela composição da atmosfera.

c) Através de aerosol – Define-se através das propriedades físicas do aerosol existente no ambiente atmosférico (composição química, tamanho, forma, concentração, distribuição temporal e espacial, e outras propriedades físicas), no

qual um cenário é visualizado. Medidas das partículas são realizadas para quantificar as características do aerosol.

2.2.2. Atenuação atmosférica

A trajetória de um feixe de laser na atmosfera é irregular, uma vez que a densidade do ar, assim como o índice de refração varia com a altura de forma igualmente irregular. Estas variações de densidade tornam-se mais evidentes nas regiões onde existem acidentes geográficos muito abruptos, como vales ou montanhas, pois nestes lugares existe uma grande concentração de calor, ou de vento. Além disso, a atmosfera pode ser afetada pelos efeitos de nevoeiro, neve, garoa ou fumaça.

A atenuação da potência do laser na atmosfera é descrita pela Lei de Beer [16].

$$t(R) = \frac{P(R)}{P(0)} = e^{-sR} \quad (2.4)$$

onde:

R = comprimento do enlace (Range), em km.

$P(R)$ = Potencia do laser em R

$P(0)$ = Potencia do laser na fonte

$t(R)$ = Transmitância no comprimento R

s = coeficiente de atenuação, em km^{-1}

O valor de s na eq. (2.4) é expressado em km^{-1} . A relação $P(R)/P(0)$ na mesma equação permite transformá-la em dB, o que define o parâmetro L_{atm} . Assim:

$$L_{\text{atm}} [\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{P(R)}{P(0)} \right) = 10 \log \left(e^{-sR} \right) \quad (2.5)$$

O coeficiente de atenuação s está definido em função da visibilidade e do comprimento de onda I :

$$s = \frac{3.91}{V} \left(\frac{I}{550\text{nm}} \right)^{-q} \quad (2.6)$$

onde:

V = Visibilidade em km.

I = comprimento de onda em nm.

q = tamanho da distribuição das partículas que criam o espalhamento
 = 1.6 para $V > 50$ km ;
 = 1.3 para $6 < V < 50$ km ;
 = $0.585 V^{-1/3}$ para $V < 6$ km.

O uso da eq. (2.6) permite determinar o coeficiente de atenuação da atmosfera, o qual depende dos valores da visibilidade, que é um parâmetro coletado nos principais aeroportos do país. A visibilidade é determinada através de transmissômetros; aparelhos que determinam a capacidade da luz em atravessar a atmosfera. A medida é feita com uma lâmpada de xenon que ira a piscar de 10 em 10 segundos. Caso o ambiente fique mais carregado de partículas de neblina ou nevoeiro, o transmissometro irá piscar a cada segundo.

A perda atmosférica, como um todo, calcula os efeitos provocados pelos aerosols e pela cintilação. Porém, como será descrito no item 2.7, a perda atmosférica é o último item a ser colocado no balanço de potência, após ser inserida as diversas perdas que formam parte do enlace de FSO.

A perda por cintilação é um item especial que as referencia de FSO comentam pouco, tanto na formulação como nos valores em dB. A análise deste parâmetro é explicado no item 2.4.

2.3 Perda do Espalhamento Geométrico

A perda do espalhamento geométrico depende da potência que é recebida após o feixe de luz ter atravessado o espaço livre, e áreas do transmissor e do receptor, tal como é mostrado na Figura 2.7.

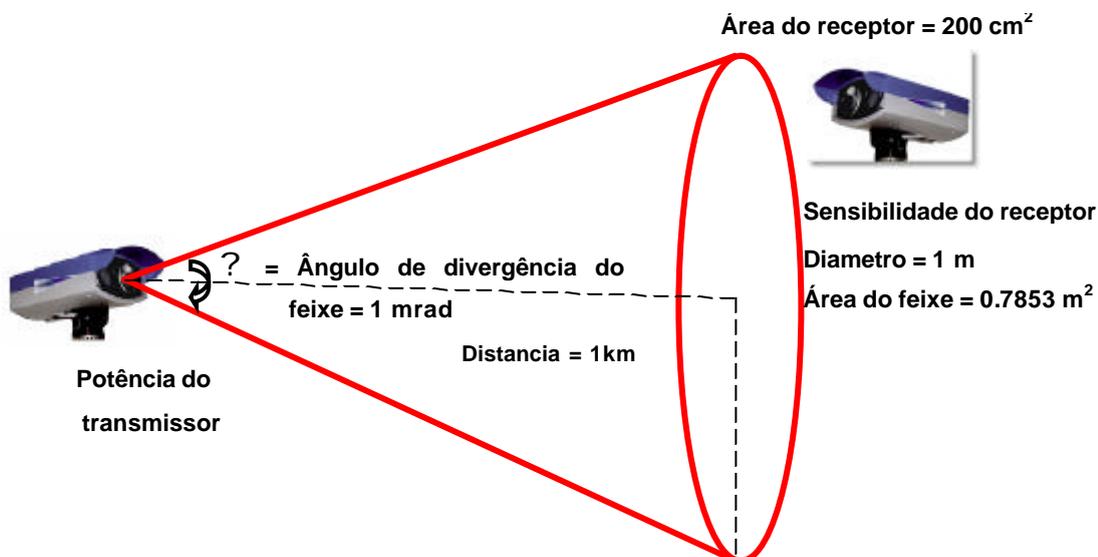


Figura 2.7 - Perda do espalhamento geométrico

Considera-se na Figura 2.7, um feixe se propagando num ambiente onde a turbulência atmosférica é nula. Deste modo, o diâmetro do feixe de laser aumentará devido à divergência, assim, a área do feixe que chega no receptor aumentará conforme aumente o comprimento (R) do enlace.

Se o espaço percorrido pelo feixe é afetado pela turbulência, o espalhamento do laser aumentará ainda mais.

A formula para a perda geométrica será [16]:

$$L_{\text{Geo}} = \frac{SA_R}{N \cdot SA_T + \frac{P}{4} (\theta \cdot R)^2} \quad (2.7)$$

onde:

SA_R = Superfície no receptor (m^2)	SA_T = Superfície no transmissor (m^2) θ = Ângulo de divergência do feixe (mrad)
R = Comprimento do enlace (km) – Range	
θ = Ângulo de divergência do feixe (mrad)	

SA_T poderá ser desprezada se for muito pequena comparada com SA_R .

O valor de N é definido como a quantidade de feixes que o TX utiliza para propagar-se.

2.4 Perda por Cintilação

2.4.1. Estudos iniciais sobre a cintilação

Cintilação é definida como a variação temporal e espacial da intensidade da luz, provocado pela turbulência atmosférica que atua sobre o enlace do FSO. A turbulência atmosférica é provocada pela temperatura conjuntamente com a pressão e intensidade dos ventos. Um exemplo deste fenômeno é apresentado na Figura 2.8.

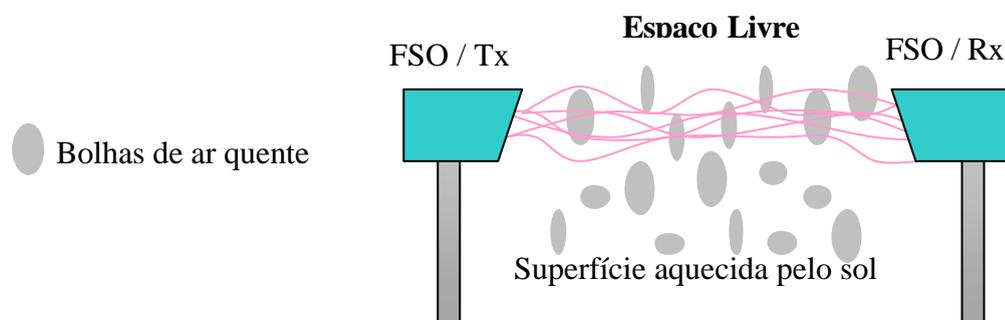


Figura 2.8 - Comportamento do feixe de laser através do espaço livre.

A partir destas combinações são criadas bolhas de ar quente que distorcem o caminho do laser, tal como esquematizada na Figura 2.8.

Embora a cintilação seja um processo atmosférico muito conhecido, ainda não foi definido com exatidão. Para o FSO, estudos teóricos determinaram que o aumento do diâmetro do receptor influencia a favor de uma boa recepção do sinal. Bertolotti [15] menciona ainda algumas observações:

a) A distribuição de probabilidade da cintilação é lognormal, seja qual for o tamanho da abertura do receptor (de 1mm até 1m. de diâmetro)

b) A variância da distribuição lognormal diminui suavemente na abertura desde 1 mm até os 10 cm, mas essa variação parece quase nula desde os 10 cm até 1m de abertura.

Uma explicação mais detalhada é fornecida no Anexo A.

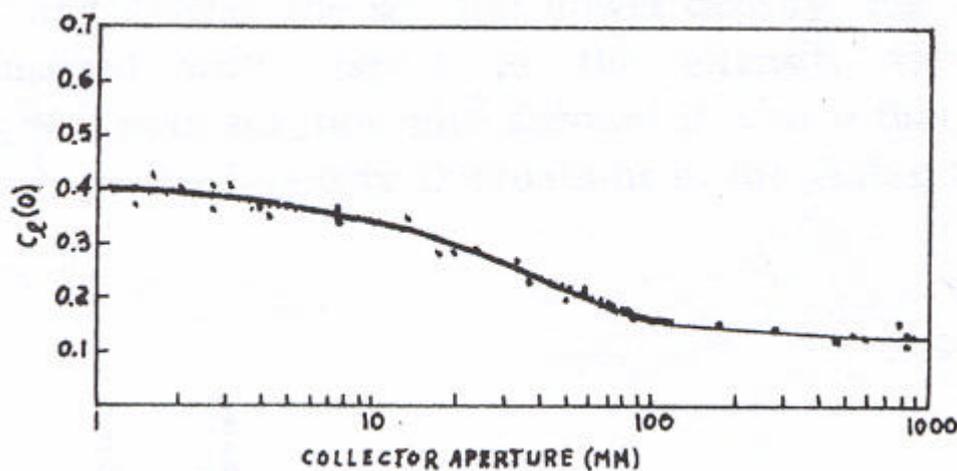


Figura 2.9 – Dependência da variância da distribuição lognormal $C_\lambda(0)$ vs. diâmetro da abertura no receptor [15].

A Figura 2.9 apresenta os dois enunciados acima mencionados deixando evidente que, aumentando o diâmetro da abertura do receptor acima de 10 cm, a diminuição das perdas por cintilação será mínima.

Num enlace de comunicação óptica terra-terra é importante e necessário reduzir a cintilação para prevenir o desvanecimento do feixe portador, e conseqüentemente a perda da informação.

Inicialmente, define-se que na atmosfera existem variações de temperatura, de pressão e de umidade, além de ventos. Isso motivará flutuações no valor do índice de refração n . Todo esse fenômeno cria uma turbulência atmosférica, na qual o

feixe vai se propagar. Esta turbulência óptica pode ser catalogada de fraca, moderada e forte, dependendo do valor da variância de Rytov, que constitui uma medida da intensidade da turbulência óptica. A variância de Rytov é definida como:

$$s_1^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} R^{1/6} \quad (2.8)$$

onde:

s_1^2 = variância de Rytov.

C_n^2 = parâmetro da estrutura do índice refrativo.

k = número de onda = $2\pi / \lambda$

R = comprimento do enlace (metros) - Range

s_1^2 representa a variância das flutuações da irradiância em forma logarítmica, que aumentará ou diminuirá de acordo com o valor do C_n^2 ou R .

A irradiância é a potência incidente numa unidade de superfície, medida em W/m^2 .

C_n^2 definirá experimentalmente se a turbulência atmosférica é fraca, moderada ou forte. Para isso, mostra-se a seguinte formula: [25]

$$C_n^2(z) = \frac{\langle (T(x, z) - T(x + r, z))^2 \rangle}{r^{2/3}} \left[80 \times 10^{-6} \frac{P(z)}{(T(z))^2} \right]^2 \quad (2.9)$$

Para obter experimentalmente C_n serão necessário dois sensores de temperatura separados a uma distancia r . Nesta equação, tem-se que:

$P(z)$ = Pressão medida em milibars.

$T(x, z)$ = Temperatura de um sensor na posição x e a uma altura z .

$T(x + r, z)$ = Temperatura do segundo sensor, na posição $x + r$ e a uma altura z .

A altura z corresponde à altura do cabeçote receptor, e o afastamento entre os dois sensores de temperatura é de alguns centímetros. A temperatura é medida em graus Kelvin.

Um exemplo para C_n é dado na Figura 2.10, feito nas Montanhas Rochosas perto de Boulder, Colorado [26]. Esta figura apresenta o comportamento da turbulência óptica atmosférica num período de 24 horas, em vários enlaces de comprimento de 50, 310, 500 e 1000 metros.

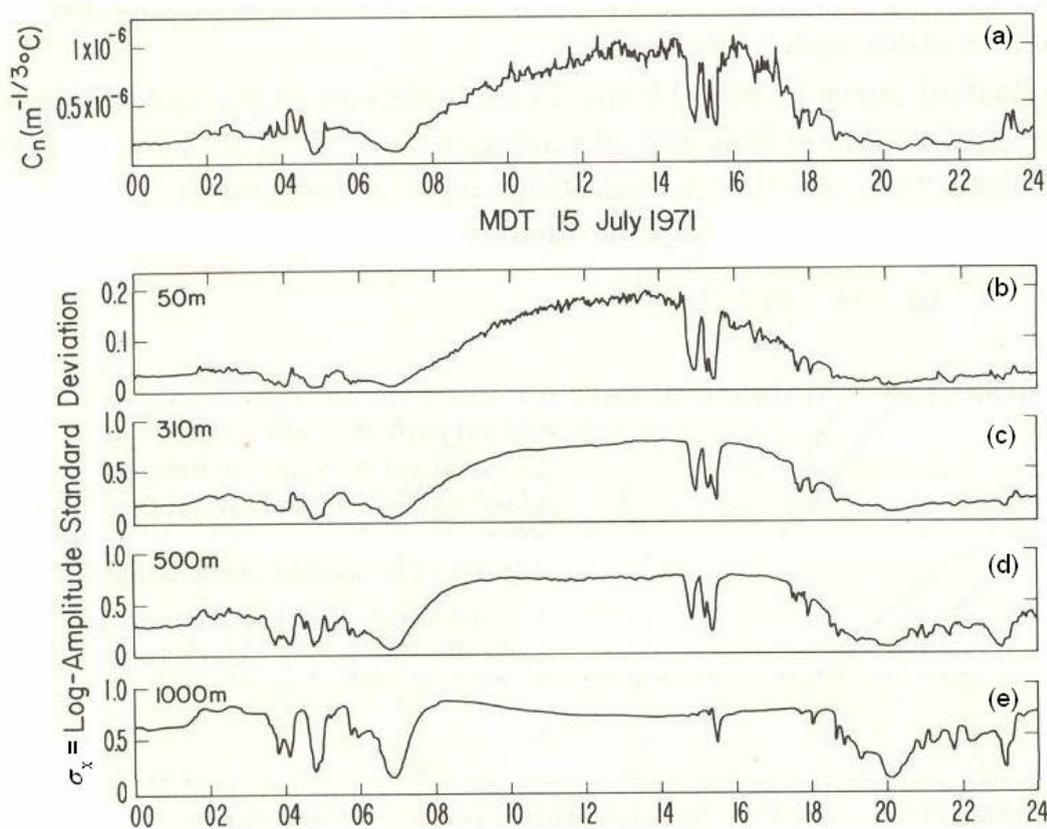


Figura 2.10 - Comportamento experimental do C_n (a) e a sua relação com o desvio padrão da amplitude logarítmica σ_x (b-e) calculado para os comprimentos de 50, 310, 500 e 1000m de comprimento, num período de 24 h [26].

Neste trabalho, o uso da variância de Rytov s_1^2 será utilizado para determinar os valores em dB da cintilação. Para explicar a Figura 2.10, torna-se necessário fazer uma relação entre s_1^2 e o desvio padrão da amplitude logarítmica σ_x , que é apresentado no eixo esquerdo das Figuras 2.10 (b-e). Durante o experimento realizado nas Montanhas Rochosas, foi utilizada uma fonte de luz incandescente e a intensidade de energia que atingia os receptores nos diversos enlaces foi coletada num período de 24 horas. A amplitude do sinal afetado pela turbulência atmosférica e que chegava ao receptor era processada. Os dados obtidos mostram um formato muito similar com aquelas apresentadas no Anexo A, Figuras A.1.(a-b), embora essas figuras não representem os dados dos valores obtidos nas Montanhas Rochosas, e sim ofereçam uma visão geral das flutuações da irradiância, distribuídas de forma logarítmica. A relação matemática existente entre s_1^2 e σ_x^2 é definida em [26] como:

$$\sigma_1^2 = 4\sigma_\gamma^2 \quad (2.10)$$

Um comentário adicional relacionado à eq. (2.10) é apresentado no ANEXO B.

Nesta equação, σ_γ^2 recebe o nome de variância da amplitude logarítmica. O valor apresentado para σ_γ^2 resulta ser de:

$$\sigma_\gamma^2 = 0.31 \cdot k^{7/6} \cdot R^{11/6} \cdot C_n^2 \quad (2.10)$$

A eq. (2.10) fornece uma relação de proporcionalidade entre s_γ e C_n . A Figura 2.10.a e a 2.10.b confirma esta proporcionalidade. Mas isso não acontece nos enlaces com R maiores, onde o aumento da turbulência atmosférica não produz um correspondente aumento em s_γ . Assim, C_n aumenta entre as 8:00 e as 14:00 horas, porém no enlace de 1000m (Figura 2.10.e) o valor de s_γ diminui. Isso indica que entre C_n e s_γ existem outros parâmetros que não foram considerados. Clifford [26] indica que esta equação só serve para valores de $\sigma_\gamma^2 \sim 0.1$ ($s_\gamma^2 \sim 0.4$), sem que seja afetado pelos efeitos de múltiplos espalhamentos ou turbulência forte.

A dependência de s_γ com o comprimento do enlace R também é inadequada para explicar os dados obtidos, já que s_γ não apresenta um aumento proporcional ao comprimento do enlace, senão que s_γ apresenta valores muito próximos, e em alguns casos, estes valores caem. Veja o comportamento de s_γ no horário das 14:00 horas. No enlace de 50m (Figura 2.10.b) s_γ possui o valor de 0.17; no enlace de 310m (Figura 2.10.c) o valor de s_γ aumenta para 0.7, porém, nos enlaces de 500m e de 1000m (Figura 2.10.d e 2.10.e) o valor de s_γ fica mais próximo de 0.6 ~ 0.55, confirmando que não existe uma proporcionalidade entre estes parâmetros. Poder-se-ia considerar que para enlaces menores de 250 m, C_n definirá o perfil da cintilação para um enlace de FSO com uma boa aproximação. Este tipo de afirmação deverá ser tomado em conta no item 2.4.2, já que C_n^2 foi coletado para um enlace de 1000 m, que estará sujeito a diversos fatores ambientais e às variações da cintilação.

2.4.2. Valores experimentais

A Figura 2.11 apresenta os valores de C_n^2 obtida no Rio de Janeiro, no dia 16 de fevereiro do 2003. Os dados foram coletados de uma unidade de medição do Aeroporto do Galeão obtido pelo pessoal da Infraero. Estes valores permitirão obter uma noção clara do comportamento da turbulência atmosférica através de cálculos teóricos e matemáticos. As técnicas como foram obtidos os dados de C_n^2 estão indicados em [26, 27].

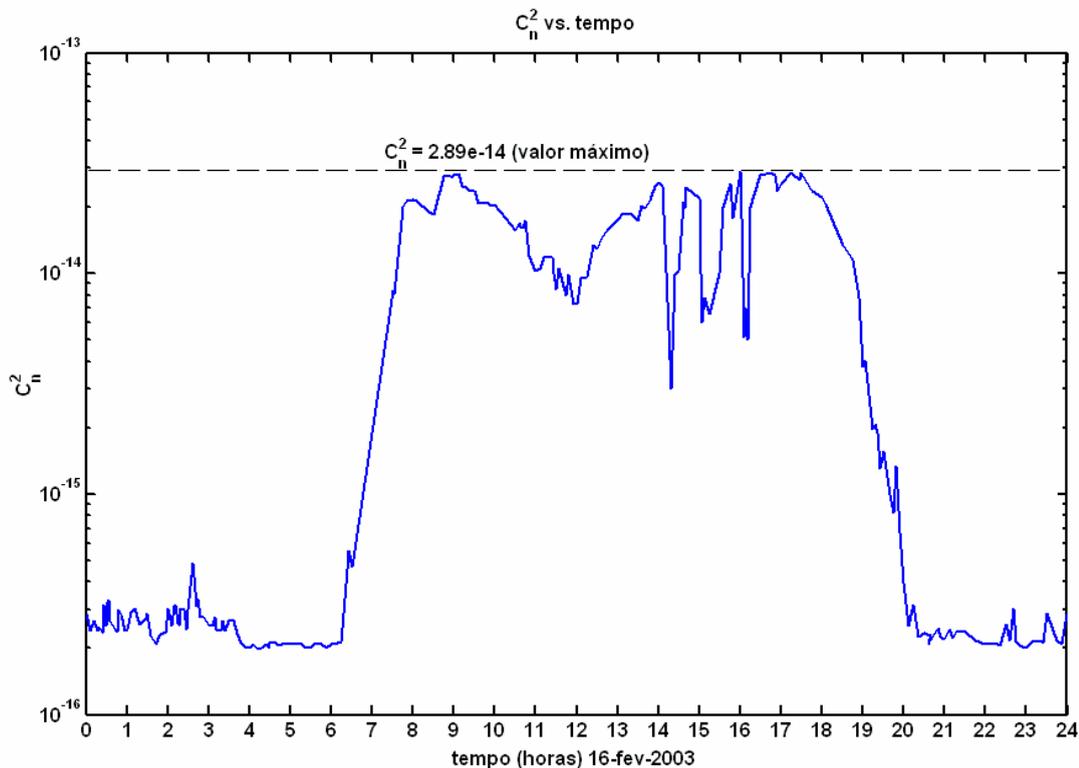


Figura 2.11 - C_n^2 vs. tempo. Uma mudança no comportamento da atmosfera pode ser observada no período do nascer e do por do sol.

A Figura 2.12 apresenta o comportamento de s_1^2 de acordo com a eq. (2.8). Deste modo, o valor de s_1^2 diminui quando o comprimento de onda aumenta. Para obter a Figura 2.12, foram utilizados os valores de C_n^2 apresentados na Figura 2.11. Observa-se que existem diferenças de valores de s_1^2 entre $\lambda = 785$ nm, 850 nm e 1550 nm. Por outro lado, podem ser definidos diversos níveis de turbulência óptica segundo o valor de s_1^2 . A turbulência óptica fraca acontece quando $s_1^2 < 1$, a turbulência moderada ocorre quando $s_1^2 \sim 1$, e a turbulência

forte acontece quando $s_1^2 \gg 1$. Nesta Figura 2.12, a turbulência óptica em 785 nm e 850 nm é moderada e em 1550 nm é considerada fraca. O valor assinado ao parâmetro R é de 1000m.

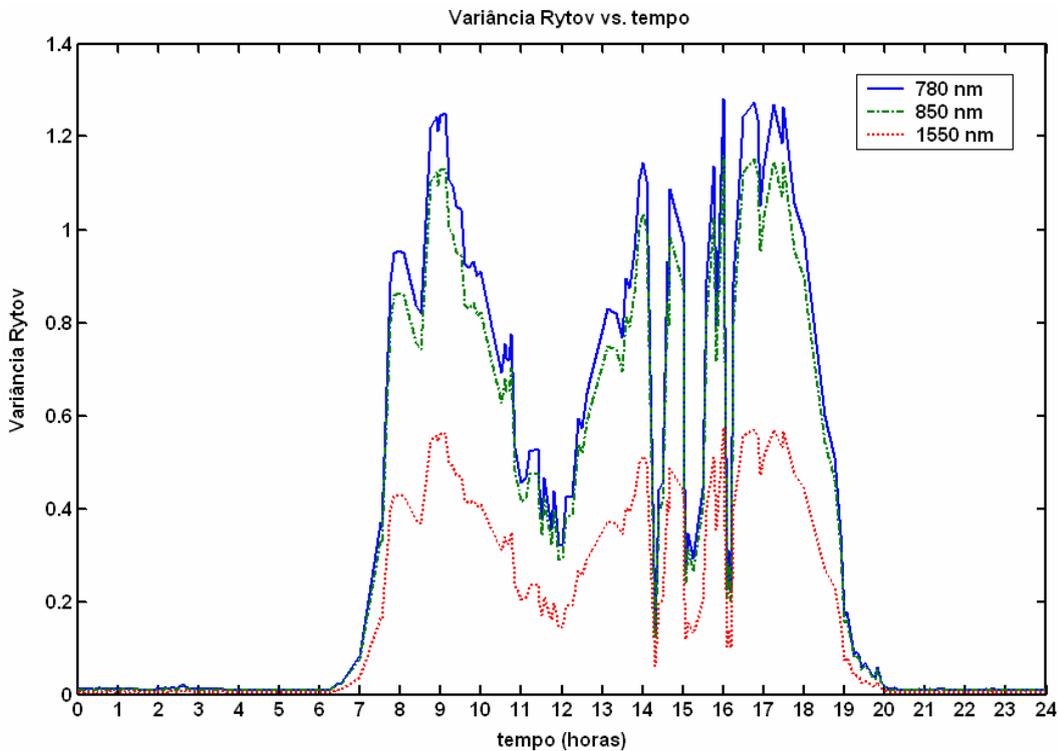


Figura 2.12 - Variância de Rytov s_1^2 vs. tempo. Observa-se que existem diferenças no comprimento de 785, 850 e 1550 nm. sendo que a turbulência atmosférica é moderada, moderada e fraca, respectivamente.

Feita essa confirmação é necessário encontrar o valor referente à perda por cintilação, calculado em dB, que permita ser inserido no balanço de potencia do FSO. Para isso, a referencia [28] define s_1^2 como:

$$s_1^2 = \left[\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \right]^2 \quad (2.12)$$

Da eq. (2.12) define-se que:

I = Irradiancia instantânea que chega ao receptor

I_0 = Irradiancia media recebida.

A partir de [28] a definição da perda por cintilação foi determinada. Outras referencias [29,30] indicam como a cintilação (em dB) foi obtida:

$$L_{Scint} [dB] = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) dB \quad (2.13)$$

Assim, se $s_1^2 = 0.6$, determina-se a perda por cintilação combinando a eq (2.12) e a eq. (2.13) :

$$s_1 = \sqrt{0.6} = 0.7745 = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.14.a)$$

$$\exp(0.7745) = \frac{I}{I_0} = 2.1697 \quad (2.14.b)$$

$$10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\log(2.1697) = 3.36 \text{ dB} \quad (2.14.c)$$

Encontrou-se que o valor em decibel para 1500 nm. é 3.36 dB, para 850 nm é 4.71 dB e para 785 nm. será 4.95 dB.

Eric Korevaar et al [31] apresenta uma formula em que pode ser encontrada a perda por cintilação, se conhecendo o número de aberturas que possui o transmissor, permitindo enviar um ou vários feixes, que chegarão ao receptor. O diâmetro da abertura no receptor, e o comprimento do enlace também formam parte desta formula. Os valores são apresentados em dB. Deste modo, a equação é:

$$L_{\text{EricKorevaar TOTAL.}} = 2 \text{ dB} + L_{\text{Eric et al.}} \text{ dB} \quad (2.15)$$

sendo que:

$$L_{\text{Eric et al.}} =$$

$$(12/\text{Num. de Aberturas}) (100 \text{ mm./Diam. RX})^2 (\text{Range} / 1000\text{m}) \text{ [dB]} \quad (2.16)$$

O valor de 2 dB no lado direito da eq. (2.15) é referenciado como uma MARGEM, que poderá ser colocada no balanço de potência do FSO.

A expressão de $L_{\text{Eric et al.}}$ será comparada com L_{Scint} , (eq. 2.13), como é apresentado na Figura 2.13.

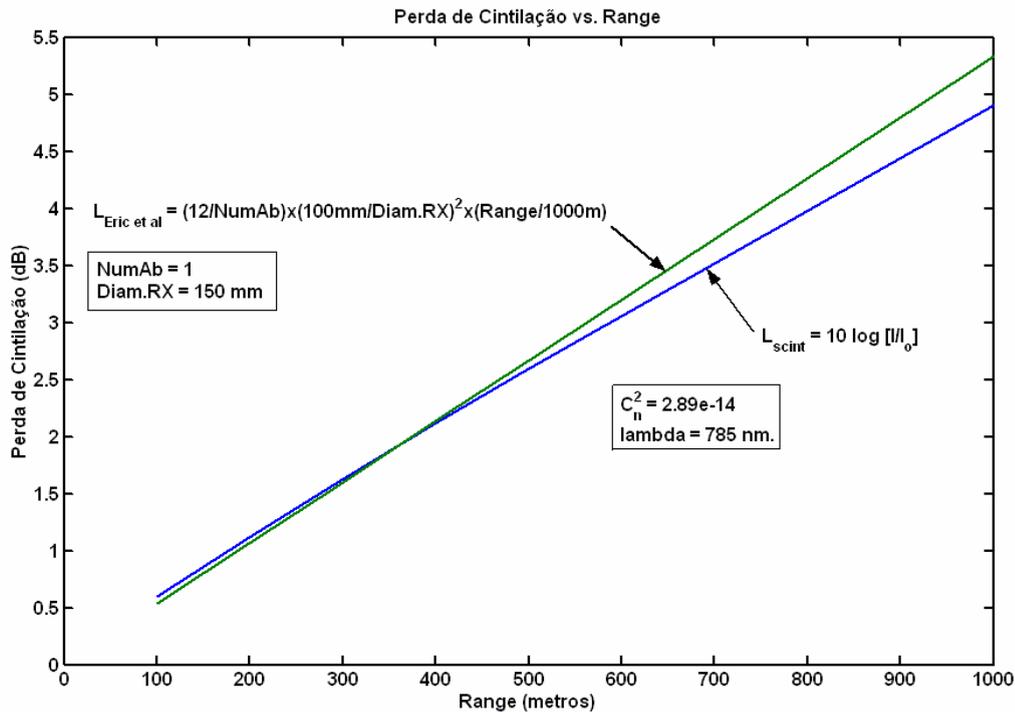


Figura 2.13 - Diferença da perda da cintilação entre a eq. 2.12 e a eq. 2.15.

Observa-se que existem diferenças entre as equações da cintilação – eq (2.13) e eq (2.16), que vai aumentando conforme aumenta o comprimento do enlace de FSO. Para a eq. (2.16), os parâmetros considerados para serem colocados na Figura 2.12 são:

- Números de Aberturas = 1, e
- Diâmetro do Receptor = 150 mm.

No caso da eq. (2.13), considera-se os parâmetros:

- $C_n^2 = 2.89e-14$, como nosso valor de pior condição atmosférica e,
- $\lambda = 785 \text{ nm.}$

O valor de λ é escolhido deve-se ao fato que o autor de [31] sempre o utilizaram em suas experiências. Deve-se mencionar que a comparação das equações (2.13) e (2.16) permitem verificar que a cintilação toma valores a partir de 0 dB.

A possibilidade de se estimar a cintilação usando outros comprimentos de onda ainda não foi definida totalmente. Os comprimentos que apresentam um maior grau de influencia e interferência pela cintilação estão em 850nm e 1550 nm, sendo que este último apresenta uma atenuação muito grande, assunto que já foi mencionado na Figura 2.12.

A literatura [16,32,33] apresenta contribuições de diferentes dados e gráficos em que foram obtidas nas condições de maior perda por cintilação. A Figura 2.14 apresenta uma aproximação das diferentes variações da cintilação em 785, 850 e 1550 nm, com vários feixes transmissores de um cabeçote FSO, e com diferentes diâmetros no receptor. As referencias indicadas neste parágrafo não mencionam se o valor da cintilação possui o valor de 0 dB quando o valor do enlace é igual a 0 km. Este trabalho deixa indicado que a cintilação deve ter um valor inicial, e este valor obrigatoriamente deve ser 0 dB ou muito próximo a ele. Os gráficos a seguir (Figura 2.14) são resultados de vários processos de comparação e interpolação entre os diferentes comprimentos de onda. A partir destas interpolações, os valores aproximados da cintilação forma obtidos. Estes valores, e a obtenção das Figuras 2.14 (a-d) estão indicados no Anexo C.

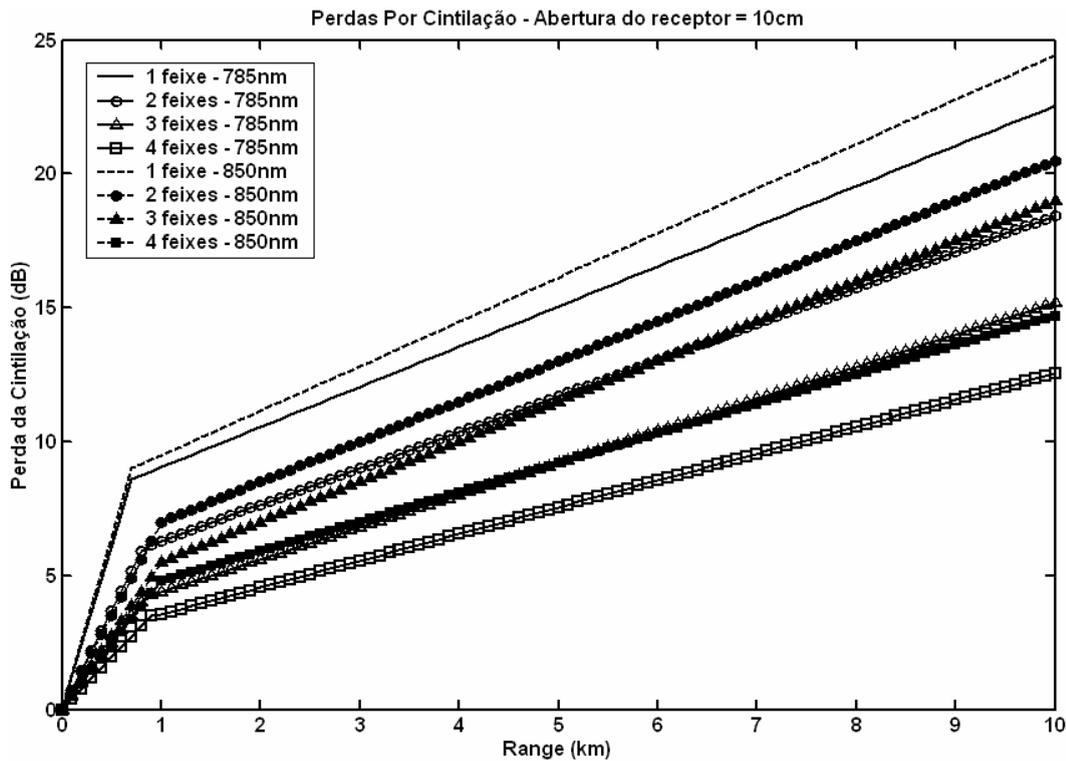


Figura 2.14a – Perda por cintilação - 785 e 850 nm – abertura do receptor de 10 cm

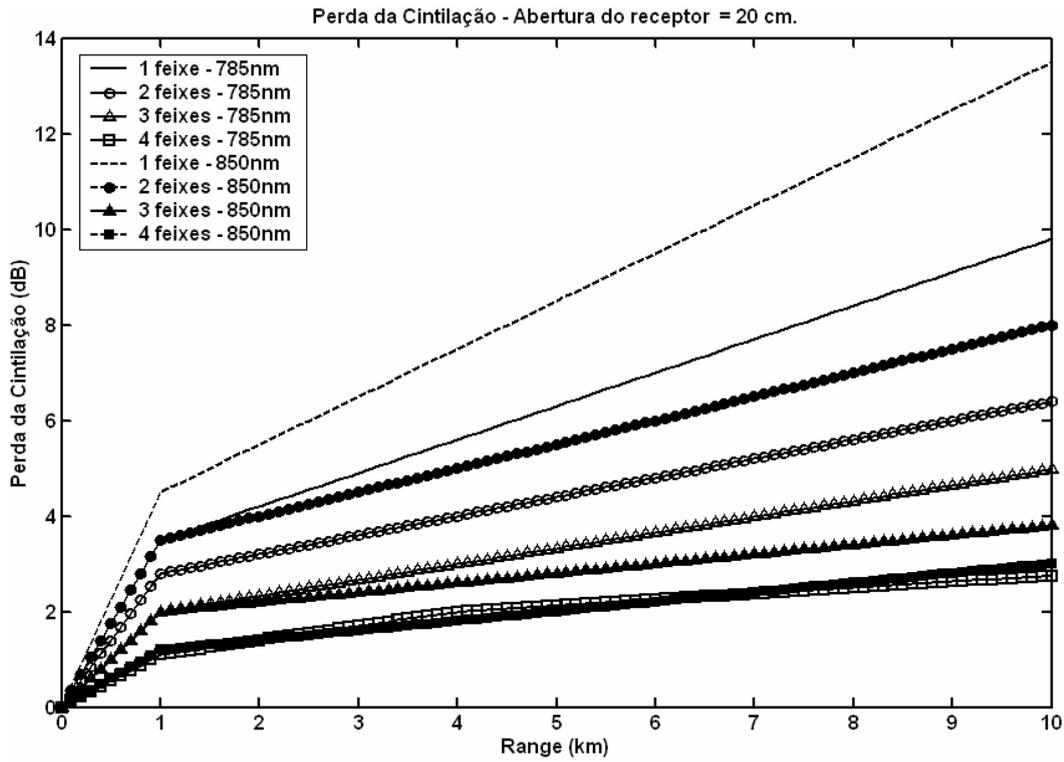


Figura 2.14b - Perda por cintilação - 785 e 850 nm – abertura do receptor de 20 cm.

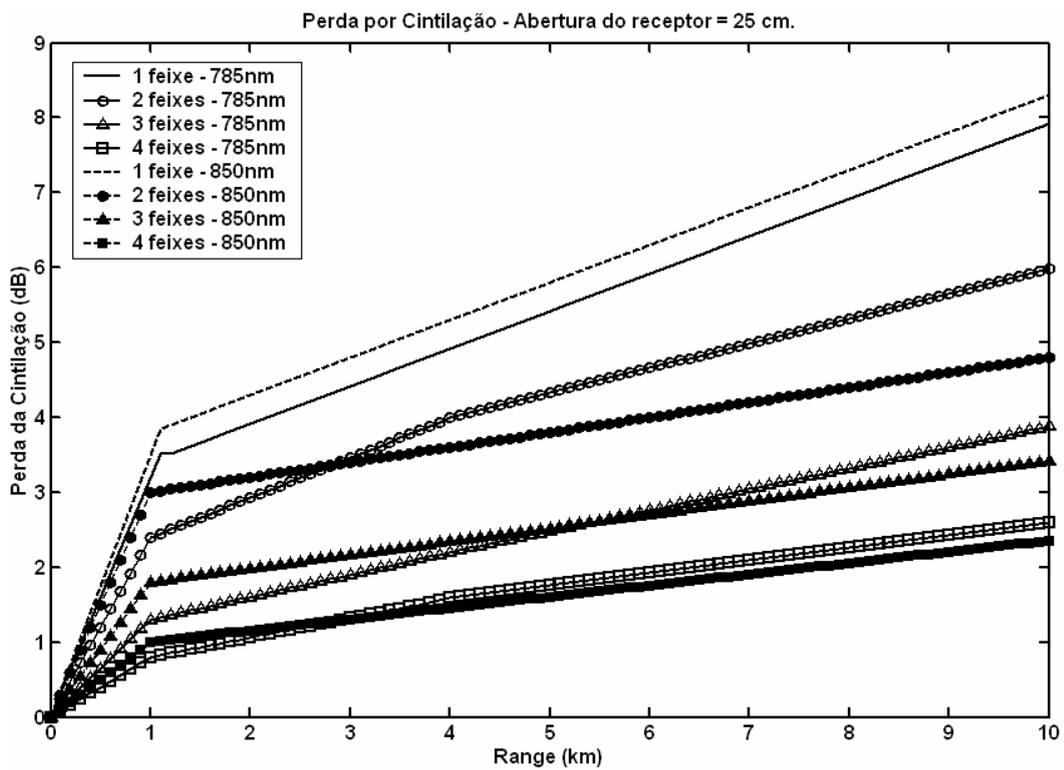


Figura 2.14c – Perda por cintilação - 785 e 850 nm – abertura do receptor de 25 cm.

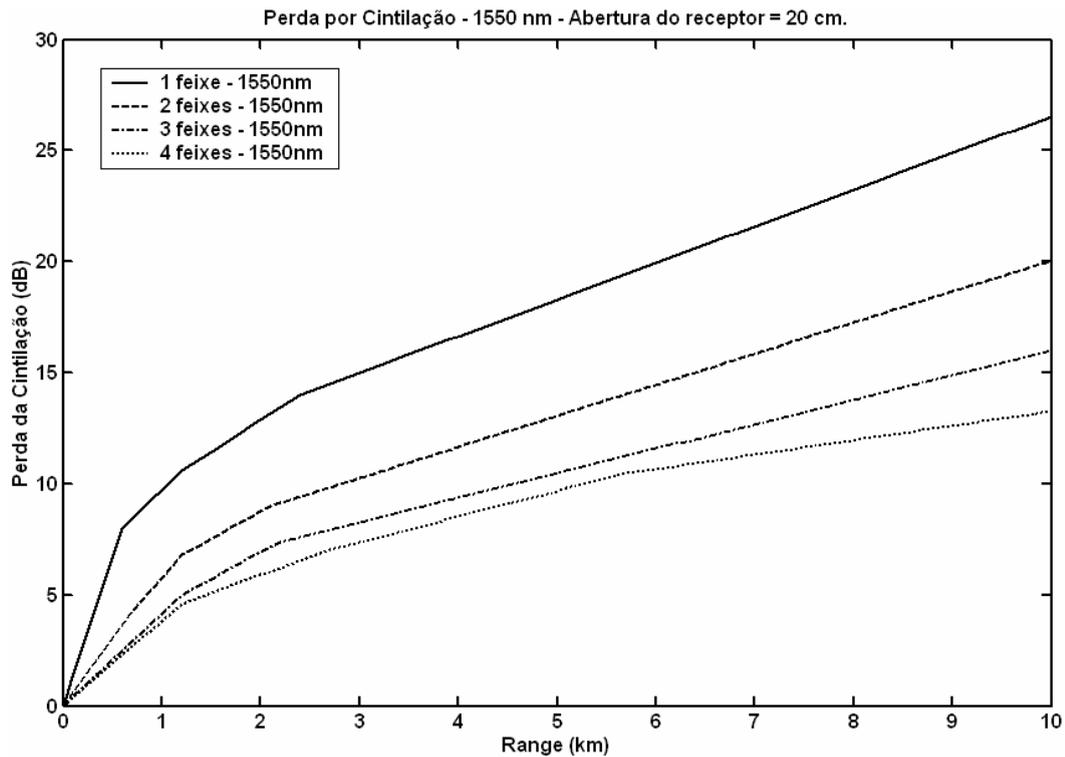


Figura 2.14d - Perda por cintilação - 1550 nm – abertura do receptor de 20 cm

Para a obtenção de uma fórmula completa para a perda por cintilação, sugere-se o uso de diversos parâmetros como C_n^2 , s_1^2 , I , Range, diâmetro no receptor e números de aberturas no transmissor. Entretanto, nesta dissertação não foi abordado a resolução deste assunto.

2.5 Outras perdas do enlace FSO

Adicionalmente, no enlace FSO, existem outras perdas inerentes, que não podem ser desconsideradas. Recomenda-se utilizar [16]:

- Perdas por alinhamento $L_{\text{Misp}} = 3$ dB e
- Perdas ópticas no receptor $L_{\text{RXOp}} = 9$ dB.

Estes valores podem mudar de acordo aos sistemas de alinhamento utilizados e à qualidade óptica das lentes receptoras. De modo geral, aceita-se estes valores para o cálculo.

Em [31], a margem de segurança adotado neste trabalho para completar o balanço de potência do FSO será de 2 dB.

2.6 Balanço de Potência do FSO

A análise de um enlace – qualquer que for a tecnologia utilizada – é uma importante etapa na sua implementação seja este em microondas ou em fibras ópticas. Neste último sistema a potência óptica que é transmitida deve ser determinada, a fim de se possa trabalhar com os receptores adequados. Porém é necessário considerar as diversas perdas originadas pela própria fibra, conectores e emendas. O receptor, tipicamente, possui uma sensibilidade mínima a uma determinada taxa de dados. O propósito dessa análise é assegurar que a potência transmitida menos o fator das perdas esteja acima do valor mínimo da sensibilidade do receptor, a fim de garantir a disponibilidade do sistema.

A mesma análise é realizada na implementação de um enlace FSO. A diferença consiste no meio aonde o laser irá se propagar. Neste caso, o fator de perdas será originado pelo ar. Considera-se os valores aproximados das perdas entre o transmissor e o receptor.

Define-se, então, o balanço de potência do FSO.

$$P_{TX} = P_{RX} + L_{Atm} + L_{Geo} + L_{Misp} + L_{RXOp} + L_{Scint} + MARGEM \quad (2.17)$$

P_{TX} = Potência óptica no transmissor [dBm].

P_{RX} [dBm] = Potência óptica no receptor [dBm].

L_{Atm} [dB] = Perda atmosférica [dB].

L_{Geo} [dB] = Perda geométrica [dB].

L_{Misp} [dB] = Perda por alinhamento [dB].

L_{RXOp} [dB] = Perdas ópticas no receptor [dB].

L_{Scint} [dB] = Perdas por cintilação [dB].

$MARGEM$ [dB] = Margem do enlace FSO [dB].

2.7. Obtenção dos valores do enlace de FSO

Após se obter o balanço de potência do FSO insere-se os diversos valores que participam nela.

Para o enlace experimental considerado, tem-se que o cabeçote do transmissor é *multibeam* (4 feixes de transmissão), sendo que cada feixe pode transmitir a 3.9 mW de potência (5.91dBm). A sensibilidade no receptor é de -41 dBm. O comprimento do enlace é de 1000 metros. A potência indicada pelo fabricante, utilizando os 4 feixes atingiria 2000 metros em condições de boa visibilidade.

Além disso, a taxa de transmissão utilizada no enlace FSO foi de 155 Mbits/s [34].

Na Figura 2.15 observa-se o formato da Perda Atmosférica (até 30 dB), tomando-se em consideração a Visibilidade de 0 até 10 km e a dimensão do enlace de FSO de 0 até 10 km, nos comprimentos de onda de 785, 850 e 1550nm.

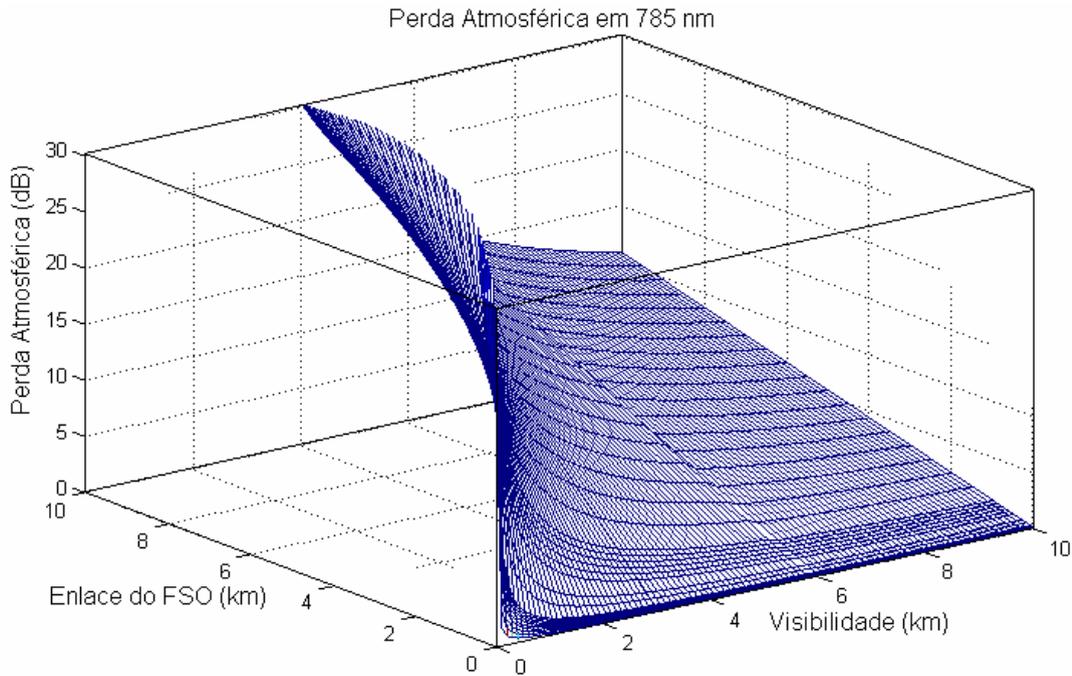


Figura 2.15a – Gráfico geral da perda atmosférica vs. Visibilidade vs. Enlace do FSO em 785 nm.

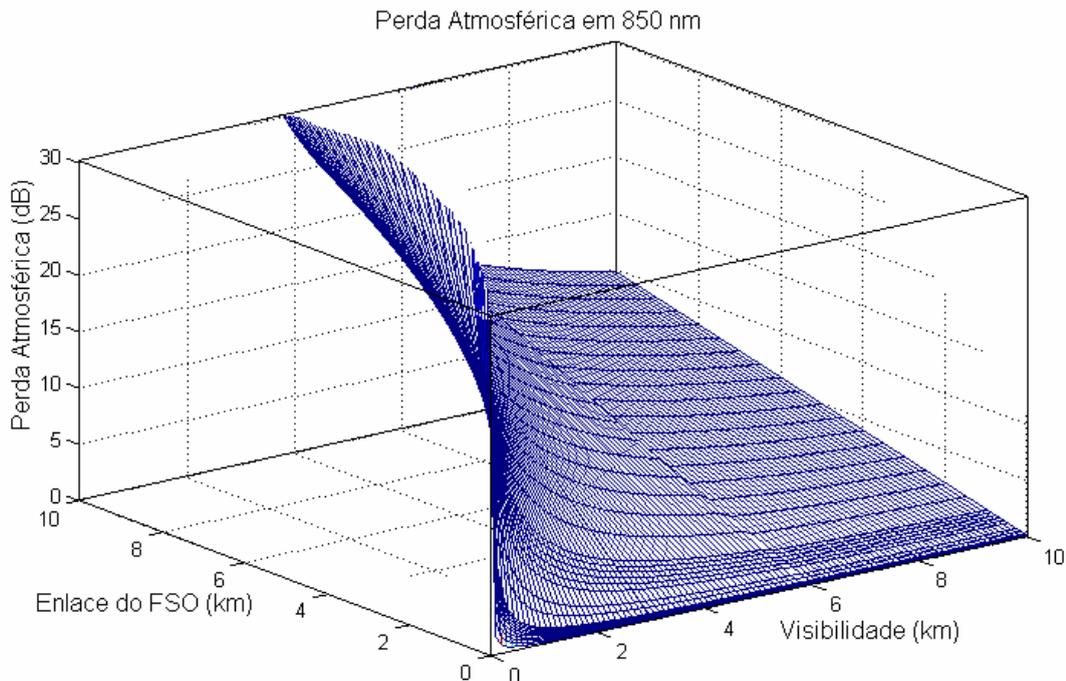


Figura 2.15b – Gráfico geral da perda atmosférica vs. Visibilidade vs. Enlace do FSO em 850 nm.

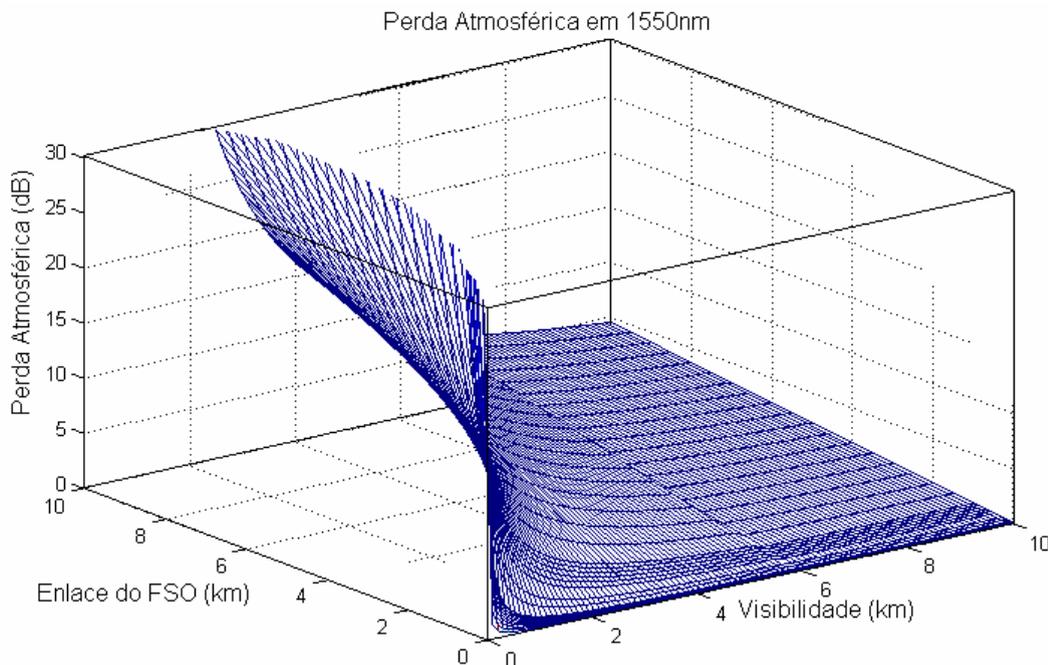


Figura 2.15c – Gráfico geral da perda atmosférica vs. Visibilidade vs. Enlace do FSO em 1550 nm.

A partir destes gráficos será obtido o dimensionamento do enlace de FSO, e progressivamente serão inseridas as perdas. Considera-se que o enlace possui 1km de comprimento e I seja de 850 nm.

Em relação à perda geométrica, considera-se que, a área de transmissão SA_T é de $0,001 \text{ m}^2$ quando utilizado um único feixe no transmissor. Contudo, a área de transmissão passa a $0,005 \text{ m}^2$ quando são utilizados 4 feixes no transmissor ($N = 4$). Além disso, a área no receptor SA_R é de $0,031 \text{ m}^2$ e o ângulo da divergência fica em 1mrad. O valor da perda geométrica é de 13,98 dB com um único feixe e passa a 14,00 dB quando utilizados os quatro feixes.

No que tange à perda por cintilação, o valor assumido é de 4,5 dB, com uma abertura de 20 cm de diâmetro na recepção para um único feixe, e o valor de 1 dB quando são utilizados quatro feixes no transmissor. A frequência utilizada foi de 850 nm. Coloca-se, adicionalmente, uma margem de segurança de 2dB.

Considera-se, também, as perdas por alinhamento do feixe (3 dB), e as perdas ópticas no receptor (9 dB).

Finalmente considera-se a perda atmosférica, cujos valores em dB são de 14,43 dB e 23,93 dB, quando utilizados um e quatro feixes respectivamente.

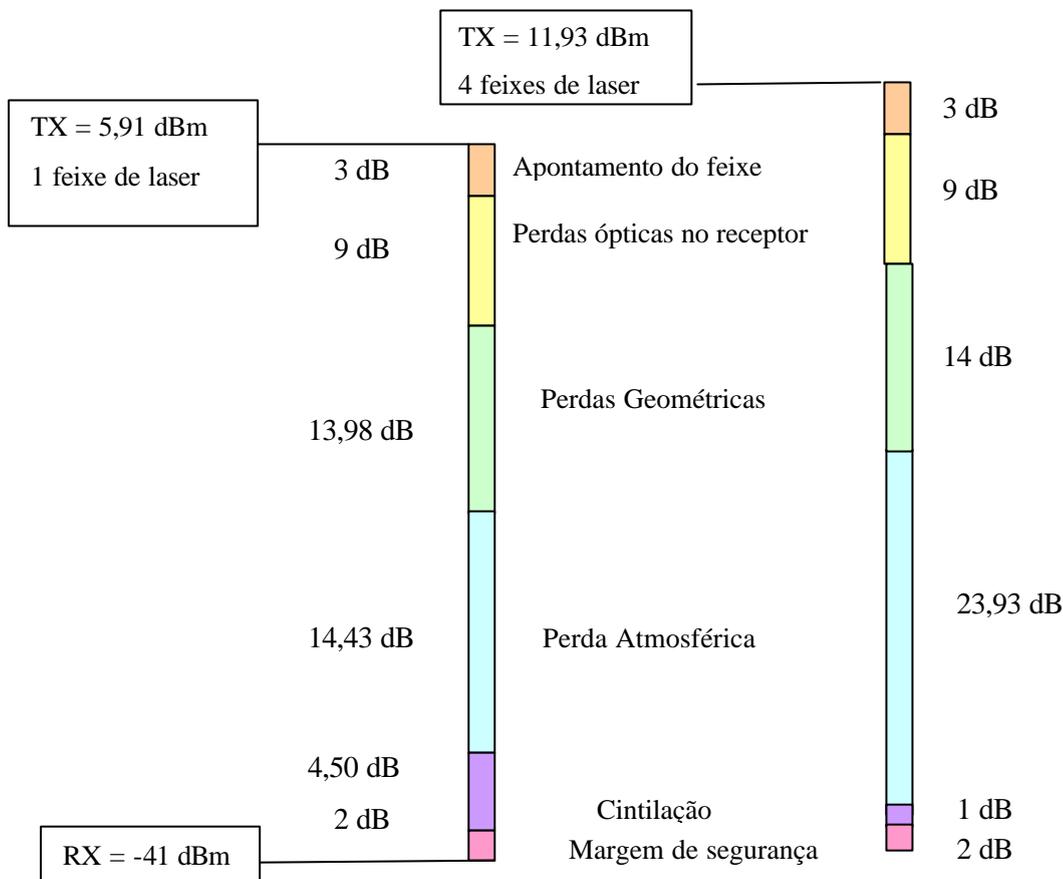


Figura 2.16 - Parâmetros do enlace de FSO. Para este caso, considera-se a pior situação na perda atmosférica, e a pior situação na cintilação, com um e quatro feixes de laser transmitindo.

A Figura 2.16 mostra os elementos que constituem o enlace do FSO em 785 nm para o enlace de 1 km, testado perto do aeroporto do Galeão.

Caso sejam utilizados os quatro feixes de laser do transmissor, a potência seria 11,93 dB, permitindo suportar uma maior perda atmosférica e de cintilação.

Para um enlace longo, as perdas atmosféricas e por cintilação precisam ser minimizadas, permitindo com que os enlaces FSO com alta capacidade de transmissão (155 Mbps ou maiores) fiquem livres de erros. Isto nem sempre é possível pelos seguintes motivos: O diâmetro do feixe do laser no receptor pode ser diminuído, o que permite a redução da perda geométrica, porém o alinhamento do feixe tornar-se-á mais difícil, ainda mais em enlace maiores de 1 km. Alguns mecanismos de alinhamento automático, por meio de “guimbais”, estão sendo

implementados, possibilitando uma rápida intervenção na manutenção do enlace.[35]

A sensibilidade do receptor é o fator que descreve a capacidade de detectar a menor potência óptica no enlace de FSO. Uma boa sensibilidade de uma APD permite que um enlace de FSO possa atingir uma distância favorável entre dois cabeçotes (aproximadamente de 2 a 4 km de enlace).

2.8. Resumo do Capítulo 2

Os diversos parâmetros que conformam a equação de potência do FSO foram apresentados. A partir de [24], diversos autores realizaram uma análise detalhada da perda atmosférica, sendo que neste trabalho se utilizou um software dado em [22] para exibir o espalhamento do laser em uma partícula de água. Além disso, apresenta-se a perda atmosférica através da lei de Beer e do coeficiente de atenuação S , indicado nas equações (2.4) e (2.5). Menciona-se que o aerosol e a cintilação fazem parte desta perda.

A perda geométrica está relacionada com o espalhamento que sofre o feixe de laser, devido ao ângulo de abertura do qual o feixe sai do transmissor, sendo que no receptor, o feixe terá uma densidade de potência menor; concentrando essa potência no centro da área circular que atinge ao receptor.

A perda por cintilação é descrita com detalhes, sendo que este parâmetro não é muito comentado em outras referências bibliográficas destinadas a FSO. No Anexo C é apresentada uma tabela de possíveis valores em dB destas perdas.