

Sistemas Ópticos no Espaço Livre: Estudo da Viabilidade de Implantação em Cidades Brasileiras

P. B. Harboe e J. R. Souza

Resumo —Sistemas Ópticos no Espaço estão sendo desenvolvidos em todo o mundo como uma alternativa econômica à tecnologia de fibra óptica nas mais diversas aplicações. A principal desvantagem destes sistemas é sua vulnerabilidade a efeitos atmosféricos. Este trabalho apresenta um consistente estudo da viabilidade de implantação destes sistemas nas diversas regiões brasileiras. Foi desenvolvido um modelo numérico, baseado no conceito de balanço de potência, que analisa as diferentes contribuições para a perda total em um enlace óptico. Os resultados, inéditos na literatura, são apresentados na forma de disponibilidade em função do alcance do enlace e indicam boa confiabilidade dos sistemas em algumas regiões do país.

Palavras-Chave—Comunicações ópticas, sistemas ópticos no espaço livre.

Abstract—This work presents a consistent feasibility study of the deployment of free space optical (FSO) communication systems in several regions of Brazil. A numerical model was developed for the analysis of the different loss contributions on a free space optical link. The model is based on the power budget of the system. The results show the system availability as a function of the range, and indicate that FSO systems can be deployed with good reliability in parts of the country.

Index Terms—Optical communications, free space optical systems.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, os sistemas de comunicação óptica no espaço livre vêm sendo discutidos e sugeridos como alternativa a sistemas de fibra óptica para prover conectividade de alta velocidade, principalmente em redes locais (*Local Area Networks – LANs*) e metropolitanas (*Metropolitan Area Networks – MANs*). Estima-se que, em áreas metropolitanas, enlaces de fibras ópticas podem chegar a custar de 100 a 200 mil dólares por quilômetro, sendo que 85% deste valor são

gastos com escavações e instalação. Por outro lado, os custos de implantação de sistemas FSO são da ordem de 20% daqueles associados às tecnologias baseadas em fibra.

Sistemas FSO já são operados comercialmente nas proximidades da região do infravermelho do espectro eletromagnético, em comprimentos de onda de 750 nm, 810 nm ou 852 nm, devido à disponibilidade de lasers de baixo custo e receptores PIN e avalanche (*Avalanche PhotoDiode - APD*) com elevadas sensibilidades. Dependendo da aplicação, estes sistemas podem operar em taxas de até 622 Mb/s (ATM). Entretanto, a rápida demanda por largura de banda, principalmente em aplicações de telecomunicações, tem impulsionado a operação destes sistemas na janela de 1550 nm, onde os níveis de potência óptica de lasers são mais elevados, o que, em conjunto com a utilização de amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier – EDFA*), permite transmissões de longa distância.

Sistemas FSO têm diversas aplicações: 1) na extensão de redes metropolitanas, conectando novos anéis de fibra óptica a outros já existentes; 2) na rede de acesso, a chamada última milha (*last mile*), conectando usuários finais a provedores de Internet ou a outras redes de mais alta velocidade; 3) na aceleração da implantação/implementação de serviços, provendo infraestrutura temporária, enquanto cabos de fibra óptica são instalados; 4) na redundância de enlaces, como *backup* de um sistema de fibra óptica; 5) no provimento de conectividade temporária, como em feiras, congressos, situações de emergência ou de calamidade pública.

Dentre as aplicações mencionadas, destaca-se a de acesso à última milha (*last mile problem*), objeto de interesse neste trabalho. Estudos mostram que, mesmo nos Estados Unidos, apenas 5% dos prédios têm uma conexão direta com o *backbone* de fibra óptica, enquanto 75% destes prédios estão localizados a menos de uma milha de distância deste *backbone*. No Brasil os números são piores, indicando um enorme mercado potencial para a tecnologia FSO.

Este trabalho apresenta uma análise das condições de propagação de sinais ópticos no espaço livre. Os sistemas FSO em questão são vulneráveis aos efeitos atmosféricos, tais como atenuação (absorção e espalhamento) e cintilação, que limitam o alcance e a disponibilidade dos mesmos. Um modelo numérico baseado no conceito de balanço de potência é desenvolvido na Seção 2. Os diferentes elementos que contribuem para a perda total no enlace são descritos e avaliados. Em seguida, na Seção 3, a disponibilidade (em porcentagem de tempo) de um sistema FSO em função do

comprimento do enlace é calculada. Inúmeros resultados são apresentados, considerando diferentes cidades brasileiras e em variadas condições atmosféricas. Na Seção 4, as principais conclusões do trabalho são elaboradas.

II. FORMULAÇÃO

A caracterização de sistemas FSO é feita através do “balanço de potência”, o qual é definido como:

$$\text{Balanço de potência} = P(0) - P(R) - \alpha \quad (1)$$

onde $P(0)$ representa a potência média na saída do transmissor (dBm), $P(R)$ representa a sensibilidade do receptor (dBm) e α representa as perdas totais no enlace (dB).

Em um sistema FSO, onde o valor total das perdas no enlace não é conhecido a priori, o balanço de potência pode ser usado para estabelecer o alcance máximo, ou máxima distância de operação do enlace, para dadas características de um par transmissor-receptor. Esta é a abordagem adotada no presente estudo.

A perda total em um enlace óptico no espaço livre tem diversas componentes, tais como: perda óptica no receptor, perda por desalinhamento, perda por alargamento do feixe de laser e perda por efeitos atmosféricos.

Relatos encontrados na literatura, por exemplo [1], sugerem valores típicos da ordem de 9,0 dB para a perda óptica total no receptor e de 3,0 dB para a perda por desalinhamento do feixe de luz. A perda por alargamento do feixe de laser é definida como a razão entre a área da abertura de recepção e a área do feixe de luz no receptor. No entanto, a principal contribuição para a perda total em um enlace óptico é proveniente de efeitos atmosféricos como absorção, espalhamento e cintilação. Tais efeitos podem reduzir consideravelmente a disponibilidade de sistemas FSO e introduzir excesso de erro.

A atenuação de um feixe de laser na atmosfera é descrita pela lei de Beer [2]:

$$\tau(R) = \frac{P(R)}{P(0)} = e^{-\sigma R} \quad (2)$$

onde R é o comprimento do enlace (m), $\tau(R)$ é a transmitância à distância R , $P(R)$ é a potência do laser à distância R , $P(0)$ é a potência do laser na fonte e σ é o coeficiente total de atenuação (m^{-1}).

O coeficiente total de atenuação atmosférica σ é constituído de quatro parcelas:

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (3)$$

onde α_m é o coeficiente de absorção molecular, α_a é o coeficiente de absorção de aerosol, β_m é o coeficiente de

espalhamento Rayleigh e β_a é o coeficiente de espalhamento Mie.

Nos comprimentos de onda de interesse (entre 780 nm e 1550 nm), a atenuação por absorção molecular ou de aerosol é desprezível, assim como o efeito do espalhamento Rayleigh. Isto se deve ao fato de que as partículas em suspensão na atmosfera têm dimensão da ordem ou maior que o comprimento de onda de interesse para sistemas FSO. Desta maneira, o coeficiente de atenuação é dominado, fundamentalmente, pelo espalhamento Mie [2], o que permite escrever: $\sigma = \beta_a$.

A eficiência do espalhamento Mie é máxima para aerossóis cujo diâmetro é da ordem do comprimento de onda, tornando-se praticamente independente deste à medida que o diâmetro dos aerossóis aumenta [2]. A eficiência de espalhamento Mie depende, também, da visibilidade na atmosfera, definida como a distância em que a intensidade da luz decresce a 2% de seu valor inicial [2].

A variação do coeficiente de atenuação com a visibilidade é descrita como [2]:

$$\sigma = \beta_a = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (4)$$

Sendo,

V : visibilidade (km);

λ : comprimento de onda (nm);

q : distribuição de tamanho de aerossóis;

$q = 1,6$ em alta visibilidade ($V > 50$ km);

$= 1,3$ em visibilidade média ($6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$);

$= 0,585V^{1/3}$ em baixa visibilidade ($V < 6$ km).

Para uma completa avaliação das perdas totais no enlace, é necessário ter alguma estimativa da perda média por cintilação. No entanto, o conhecimento deste valor depende de medidas de campo de longa duração. Foi feita uma extensa pesquisa de literatura em busca de informação que auxiliasse na estimativa da perda média por cintilação, sem muito sucesso. Foram encontrados apenas alguns poucos dados, como resumido a seguir.

As referências [1] e [3] citam resultados de medidas em dois sistemas FSO operando em 780 nm. Os sistemas em questão utilizam aberturas de recepção com 10 cm e 20 cm de diâmetro e, aparentemente, apenas um feixe de *laser*. Os dados foram obtidos em enlaces de 1,2 km e 10,4 km e são listados na Tabela I.

TABELA I

Perda média por cintilação (dB) para sistemas FSO com aberturas de recepção de 10 cm e 20 cm de diâmetro.

Distância (km)	Abertura: 10 cm	Abertura: 20 cm
1,2	9	4
10,4	22	12

Na referência [4] são relatados resultados de medidas com sistemas de quatro e três feixes, operando em 850 nm. A área de recepção do sistema de quatro feixes tem diâmetro de 25 cm e a perda por cintilação foi medida em 1 dB, a uma distância de 1km. Para o sistema de três feixes, com área de recepção de 10

cm, foram medidos dois valores de perda por cintilação: 3 dB a uma distância de 500 m e 5 dB a uma distância de 1km.

A referência [5] cita resultados de medidas para um sistema de quatro feixes, área de recepção com 20 cm de diâmetro e operando em 1550 nm. Medidas realizadas no meio de um dia de verão indicaram perdas máximas por cintilação de 2,5 dB a uma distância de 450 m e 10,5 dB a uma distância de 5km.

Finalmente, a referência [6] cita resultados de medidas realizadas em um enlace de 4 km de extensão, considerando um sistema de apenas um feixe de *laser*, área de recepção com diâmetro de 20 cm e operando em 1550 nm. As medidas indicam perda máxima por cintilação da ordem de 17 dB, sugerindo a adoção de uma margem de segurança de 20 dB.

Os resultados experimentais relatados acima mostram claramente que a perda por cintilação pode ser reduzida com o emprego de múltiplos feixes de luz e/ou grande área de recepção. Os resultados também indicam que a perda por cintilação é mais severa na parte da tarde e em dias de sol forte. Outros resultados [7] indicam que a perda por cintilação aumenta com o comprimento de onda de operação.

Na ausência de dados experimentais suficientes para caracterizar a perda por cintilação em cidades brasileiras, este trabalho utiliza os resultados listados na Tabela I, junto com interpolação linear, para estimar a perda por cintilação. Para isto, dois tipos de sistemas FSO são definidos:

Tipo 1: Sistema com um único feixe de *laser* e/ou pequena área de recepção (diâmetro ≤ 10 cm).

Neste caso, a perda por cintilação em um enlace de R km é estimada como:

$$P_{cint} = \frac{13}{9,2}R + \frac{67,2}{9,2} \text{ (dB)} \quad (5)$$

Tipo 2: Sistema com múltiplos feixes de *laser* e/ou grande área de recepção (diâmetro > 10 cm).

Para este tipo de sistemas, a perda por cintilação em um enlace de R km é estimada como:

$$P_{cint} = \frac{8}{9,2}R + \frac{27,2}{9,2} \text{ (dB)} \quad (6)$$

As equações (1)-(6) são combinadas de maneira a calcular o alcance máximo do enlace, ou seja, a maior distância na qual o balanço de potência se torna nulo.

III. RESULTADOS

Com base no estudo apresentado, foi desenvolvido um *software* para avaliar a perda total em um enlace óptico no espaço livre. A disponibilidade de sistemas FSO é

estimada em função do comprimento do enlace, para diferentes cidades brasileiras. Os dados de visibilidade para as referidas cidades foram obtidos experimentalmente nos principais aeroportos brasileiros, o que fornece confiabilidade, consistência e qualidade aos resultados obtidos. O *software* permite, ainda, calcular a margem de atenuação atmosférica (em dB) e a visibilidade (em km) em função do comprimento do enlace (em km).

São considerados como dados de entrada para a análise de disponibilidade do sistema os seguintes parâmetros:

- Potência média na saída do transmissor: P_T (dBm);
- Comprimento de onda da portadora óptica: λ (nm);
- Divergência do feixe óptico: θ (mrad);
- Sensibilidade do receptor para a taxa de transmissão e BER de interesse: P_R (dBm);
- Área do receptor: A_R (m²);
- Perda óptica no receptor: P_{ot} (dB);
- Perda por desalinhamento: P_{des} (dB).

Em todas as simulações foram utilizados os seguintes valores típicos: $P_T = 13$ dBm, $\lambda = 780$ nm, $P_R = -46$ dBm, $\theta = 1$ mrad, $A_R = 0,025$ m², $P_{ot} = 9$ dB, $P_{des} = 3$ dB. A perda por cintilação é estimada de acordo com a equação (6).

Visando uma melhor exploração e entendimento dos resultados, as cidades brasileiras de interesse são classificadas por região. Inicialmente, nas Figuras 1 e 2 são apresentados resultados da média anual de visibilidade para as regiões nordeste e sudeste, respectivamente.

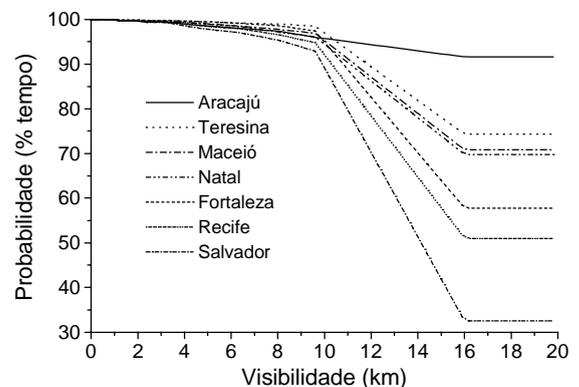


Figura 1: Média anual de visibilidade na região nordeste.

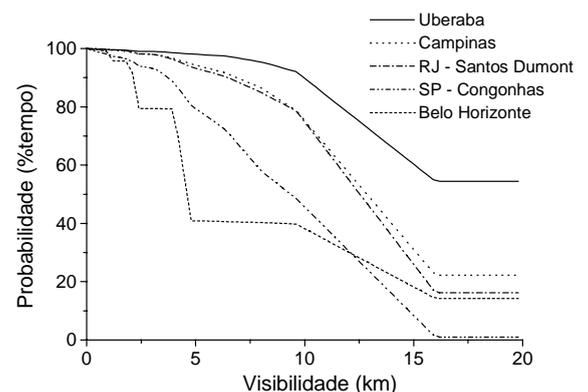


Figura 2: Média anual de visibilidade na região sudeste.

Como pode ser observado, nas capitais nordestinas, em 90% do tempo a visibilidade é superior a 10km, caracterizando a condição de céu claro (*clear*). Apenas na cidade de Aracaju este patamar é mantido para visibilidades de até 20km. Em todas as outras cidades, o índice cai rapidamente, podendo alcançar valores em torno de 30% na cidade de Salvador. Para as principais cidades da região sudeste, a situação é pior: apenas para faixas de visibilidade em torno de 5km (condição de névoa úmida – *haze* ou névoa seca – *light haze*), o índice se mantém próximo de 90%, excluindo ainda a cidade de Belo Horizonte.

Na região norte, os resultados são bastante bons para a cidade de São Luís. Na região centro-oeste, considerando valores moderados de visibilidade (até 5km), o que caracteriza a condição de névoa úmida ou seca, as estatísticas são boas para as cidades de Brasília e Goiânia. Para a cidade de Campo Grande o índice é inferior, provavelmente devido aos longos períodos de chuva. Na região sul, os resultados obtidos são surpreendentemente ruins: visibilidade inferior a 2km (condição de nevoeiro - *fog*) em 94% do tempo.

A Figura 3 mostra o alcance (comprimento máximo) de um enlace FSO em função da visibilidade. As linhas horizontais delimitam faixas de visibilidade, de acordo com as condições climáticas especificadas pelo Código Internacional de Visibilidade (*International Visibility Code - IVC*). É conveniente salientar que este resultado é válido para as diferentes regiões brasileiras em estudo. Nitidamente, a utilidade destes sistemas está limitada a distâncias inferiores a 8km. Na prática, é conveniente operar em pontos afastados da fronteira da região hachurada, de maneira a acomodar efeitos que não tenham sido previamente considerados no modelo numérico. Observa-se que apenas em condições de céu claro, os sistemas podem operar em distâncias em torno de 6km. Observa-se, ainda, que para enlaces de curta distância (<2km), existe uma relação aproximadamente linear entre visibilidade e alcance do enlace.

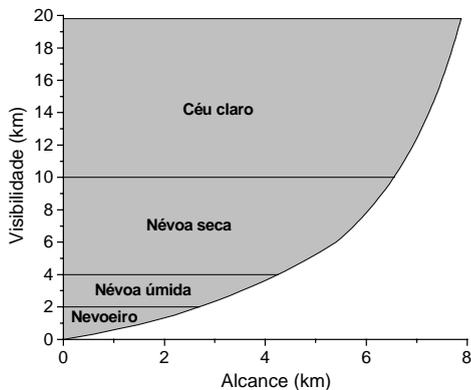
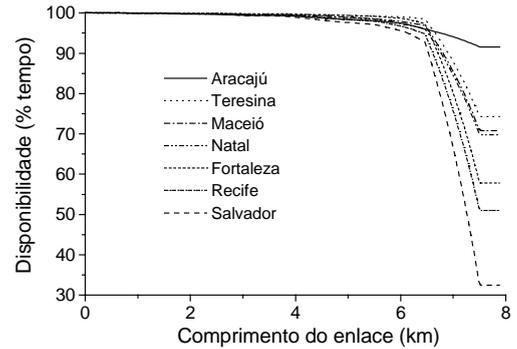


Figura 3: Alcance de um enlace FSO em função da visibilidade.

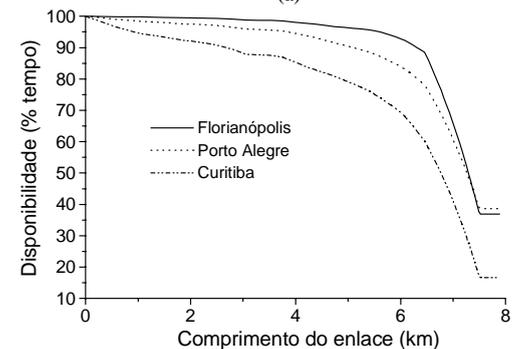
A Figura 4 mostra a disponibilidade de um sistema FSO para as regiões (a) nordeste, (b) sul, (c) centro-oeste e (d) sudeste.

Na cidade de Fortaleza, por exemplo, a disponibilidade é melhor que 99,5% do tempo para enlaces de até 4,5km. Uma avaliação semelhante em

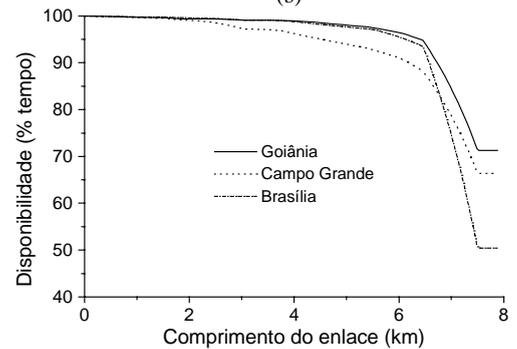
outras cidades nordestinas revela que elas oferecem condições favoráveis à comunicação FSO, devido à alta probabilidade de ocorrência de céu claro. Já para a cidade de Florianópolis, este mesmo índice de disponibilidade só é alcançado para enlaces de comprimentos menores que 2km, devido aos fortes nevoeiros, limitando bastante a implantação de sistemas nesta região. Na cidade de Belo Horizonte, sistemas FSO são praticamente inoperantes: enlaces maiores que 2,8km têm disponibilidades sempre inferiores a 80%.



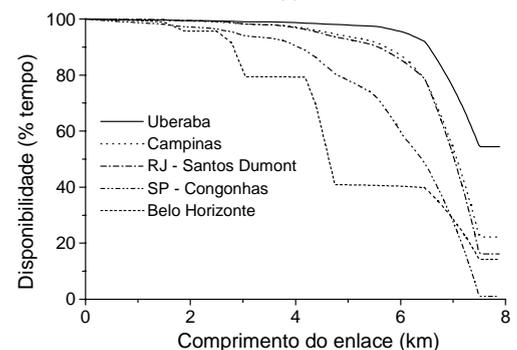
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4: Disponibilidade de sistemas FSO em função do alcance nas regiões: (a) nordeste, (b) sul, (c) centro-oeste, (d) sudeste.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um consistente estudo da viabilidade de sistemas FSO em diferentes regiões brasileiras. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo numérico baseado no conceito de balanço de potência, que permitiu caracterizar as diferentes componentes da perda em um enlace óptico e avaliar seus efeitos na disponibilidade de um sistema. Os dados de visibilidade foram coletados nos principais aeroportos, assegurando confiabilidade ao *software* desenvolvido.

Os resultados são apresentados, principalmente, na forma de disponibilidade (% de tempo) em função do comprimento do enlace (km) para diferentes cidades de interesse, classificadas de acordo com sua região. Observou-se claramente que as condições atmosféricas são determinantes na disponibilidade dos referidos sistemas.

Na região nordeste, devido às boas condições atmosféricas (condição de céu claro), sistemas FSO são capazes de oferecer qualidade e confiabilidade a custos reduzidos, tornando-se atraentes como *backup* na infraestrutura de fibra óptica já instalada e/ou na implantação de uma rede de acesso de alta velocidade.

Os resultados indicam, ainda, que a tecnologia FSO é viável em várias cidades das regiões sudeste e centro-oeste, onde enlaces com alcance típico de 3,5km e disponibilidades em torno de 98% são possíveis. Nestes casos, os sistemas FSO são particularmente úteis na solução do problema da última milha, oferecendo ampla largura de banda quando comparados com outros sistemas *wireless*.

Na região sul, sistemas FSO podem ser empregados em enlaces de curta distância, por exemplo, para o provimento de conexão temporária ou de emergência.

Como último comentário, é importante ressaltar a necessidade de aprimorar o modelo numérico de cintilação, através da coleta de dados específicos para as regiões brasileiras.

REFERÊNCIAS

- [1] I. I. Kim, J. Koontz, H. Hakakha, P. Adhikari, R. Stieger, C. Moursund, M. Barclay, A. Stanford, R. Ruigrok, J. Schuster e E. Korevaar, "Measurement of scintillation and link margin for the TerraLink laser communication system," *Wireless Technologies and Systems: Millimeter Wave and Optical*, Proc. SPIE, Vol. 3232, pp. 100-118, 1997.
- [2] D. Johnson: "*Optical Through the Air Communications Handbook*", <http://www.imagineeringezine.com/>
- [3] I. I. Kim, R. Stieger, J. Koontz, C. Moursund, M. Barclay, P. Adhikari, J. Schuster, and E. Korevaar, "Wireless optical transmission of Fast Ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication system," *Optical Engineering*, Vol 37, pp. 3143-3155, 1998.
- [4] The Effects of Weather on Wireless Communications: <http://www.taijon.com.tw/webDownload/download/Datasheet/OpticalAccess/Terescope/>
- [5] R. T. Carlson e S. Paciorek: "Environmental qualification and field test results for the SONAbeam™ 155 and 622", http://www.fsona.com/tech/white_papers/
- [6] M. J. McCullagh, D. R. Wisely e P. P. Smyth: "A low noise optical receiver for a 155 Mbit/s 4 km optical free space link", Proc. 1993 Lasers and Electro-Optics Society - LEOS Annual Meeting, pp 365 –367, 1993.
- [7] I. I. Kim, M. Mitchell, and E. Korevaar, "Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm," *Optical Wireless Communications II*, Proc. SPIE, Vol. 3850, pp. 49-62, 1999.