

Emprego Militar de Comunicação Óptica em Espaço Livre – FSO

Braulio Fernando R. Sakamoto¹, Willian Fegadolli² e José Edimar Barbosa Oliveira²

¹Centro Integrado de Guerra Eletrônica

Rodovia Parque do Contorno km 5 s/n, Setor Habitacional Taquari – Sobradinho – DF

²Departamento de Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Praça Mal Eduardo Gomes nº 50, Jardim das Acácias – São José dos Campos – SP

Resumo – Neste artigo, um resumo da tecnologia de comunicação óptica em espaço livre – FSOC (*Free-Space Optics Communications*) – é apresentada em termos de suas principais características e limitações. A formulação para o modelo adotado (*fraca turbulência*) e um breve estudo da influência do canal atmosférico sobre o desempenho do enlace são analisados. Por fim, contextualiza-se a tecnologia FSO em uma aplicação militar específica, interligando de forma segura duas posições distintas de determinada Força.

Palavras-chave – atmosfera, cintilação, espalhamento, *Free-Space Optics*, lei de Beer-Lambert, Mie, Rayleigh, turbulência, visibilidade.

I. INTRODUÇÃO

Historicamente, as modalidades de comunicação empregando portadoras ópticas remontam à Antiga Grécia, onde sinais luminosos originados pela luz do sol eram enviados a um ponto remoto utilizando discos polidos (espelhos rudimentares), de acordo com determinada codificação. Em meados de 1880, Alexander Graham Bell projetou o *photophone*, aparelho que transmitia ondas acústicas modulando a luz solar que incidia sobre um diafragma refletor. Usando tal aparato, conseguiu transmitir um sinal de voz entre dois pontos distantes cerca de 300 m entre si. A era moderna das comunicações ópticas, entretanto, teve início a partir da invenção e do desenvolvimento do primeiro laser de rubi, na década de 1960.

O desenvolvimento posterior dos diversos tipos de laser permitiu a utilização de uma parte considerável do espectro eletromagnético, até então pouco utilizada para as telecomunicações. As aplicações compreendem desde as transmissões de imagens via satélite, que permitem poupar o espaço físico e a potência utilizada em relação à de um sistema convencional de microondas (compreendendo as

antenas e os diversos guias de ondas empregados), operando em altas taxas de transmissão (50 Mbps, típ.); ou enlaces infravermelhos de médio alcance, interligando de forma segura nós de redes em uma WAN (*Wide Area Network*). Aplicações de curto alcance, como as que possibilitam a interconexão entre periféricos, também são aplicações concretas da tecnologia FSO.

II. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

Os sistemas de comunicação óptica em espaço livre, assim como aqueles que empregam canais de fibra óptica dielétrica, baseiam-se na modulação de uma portadora óptica por um sinal de informação em banda-base, digital ou analógico. A figura 1 ilustra o diagrama de blocos simplificado de um sistema FSO convencional.

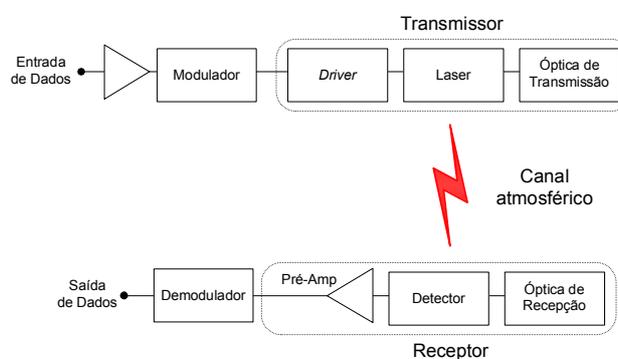


Fig. 1: Diagrama de blocos de um sistema de comunicação óptica FSO.

No esquema ilustrado na figura acima, observa-se que, ao contrário dos sistemas que empregam fibras ópticas dielétricas, ocorre propagação não-confinada da portadora óptica. Dada a natureza não-estacionária do canal atmosférico, a atenuação do enlace é relativamente difícil de ser predita; valores entre 0,2 dB/km, em um clima extremamente limpo, e 310 dB/km, durante um nevoeiro denso, são perfeitamente possíveis. A título de comparação, fibras ópticas monomodo apresentam coeficientes de atenuação da ordem de alguns décimos de dB/km (0,2 a 0,5).

Entre as diversas aplicações, a comunicação óptica em espaço livre se notabiliza por ser uma alternativa ágil e de baixo custo à utilização de fibras ópticas, quando conexões de curta e média distância, operando em altas taxas de transmissão, se fazem necessárias. Além disso, ressalta-se o aspecto de segurança do enlace, em particular quando operando em ambientes eletromagneticamente densos e sujeitos a ações de monitoração e localização eletrônica. Tais cenários são típicos do contexto moderno de operações militares, onde o eficaz exercício das atividades de guerra eletrônica e C³I impõe tais requisitos. A tabela I resume algumas das principais características de enlaces FSO.

TABELA I: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO ÓPTICA EM ESPAÇO LIVRE

<i>Free Space Optics: Características</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Instalação rápida; • Operação livre na faixa do espectro eletromagnético (780 a 1550 nm), em qualquer parte do mundo (entretanto, deve obedecer aos critérios internacionais de segurança); • Elevada segurança da informação transmitida, devido à baixa divergência do feixe de luz e lóbulos secundários extremamente reduzidos; • Acelera a implantação/implementação de serviços, provendo infra-estrutura temporária enquanto cabos de fibra óptica são instalados (quando for o caso); • Provê redundância de enlaces, como <i>backup</i> de um sistema de fibra óptica; e • Virtualmente imune à interferência eletromagnética oriunda de outros sistemas de comunicações operando nas proximidades.

Devido à atenuação atmosférica, efeitos de turbulência no ar, cintilação e perdas geométricas, o alcance destes sistemas fica limitado a distâncias que vão de algumas centenas de metros a algumas dezenas de quilômetros, dependendo das características atmosféricas locais. A seguir, será realizada uma apreciação quantitativa da tecnologia FSO, o que inclui o balanço energético do enlace e a caracterização do canal atmosférico.

III. EQUAÇÃO DO ENLACE

A formulação básica que descreve o enlace em um sistema FSO é a *lei de Beer-Lambert*, a qual atende ao modelo de propagação de um feixe óptico gaussiano em espaço ilimitado com perdas, [1]. Matematicamente:

$$P(R) = P(0)e^{-\alpha R} \quad (1)$$

onde $P(0)$ e $P(R)$ são, respectivamente, a potência óptica em uma posição inicial arbitrária e a R metros; α ($\alpha \in \mathfrak{R}^+$) é o fator médio de atenuação em [metro⁻¹]. Desconsiderando inicialmente as parcelas devidas à cintilação e à geometria do enlace, pode-se verificar que a atenuação da radiação transmitida na atmosfera é dada, basicamente, pela soma dos efeitos de absorção e de espalhamento.

No fenômeno de absorção, a energia de um feixe de radiação eletromagnética é transformada em outras formas de energia, sendo ainda um efeito seletivo, observado sob vários constituintes da atmosfera, tais como vapor d'água, ozônio, monóxido de carbono, dentre outros.

Nos espalhamentos, a energia de um feixe de radiação eletromagnética colimada é afetada pela mudança de direção que ocorre em função da existência de partículas em suspensão no meio em questão. São três os principais mecanismos de espalhamento verificados nesta situação:

- Espalhamento Molecular ou Rayleigh: produzido essencialmente por moléculas dos gases da atmosfera;
- Espalhamento Mie: ocorre quando o tamanho das partículas espalhadoras é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação; e
- Espalhamento não-seletivo ou geométrico: ocorre quando o diâmetro das partículas é muito maior que λ .

O impacto dos espalhamentos e da absorção na transmissão da luz monocromática através na atmosfera pode ser analisado separadamente, tendo-se como base a Lei de Beer. Em geral, a transmitividade τ da radiação na atmosfera, em função da distância R , é obtida a partir da equação apresentada em (1), resultando na expressão normalizada:

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

onde R e α são as constantes definidas em (1). O coeficiente de atenuação pode ser modelado como a soma de quatro parcelas distintas, resultantes da superposição de processos de espalhamento e de absorção. Matematicamente:

$$\alpha = \alpha_{aer}^{(a)} + \alpha_{mol}^{(a)} + \alpha_{aer}^{(s)} + \alpha_{mol}^{(s)} \quad (3)$$

onde os índices sobrepostos (a) e (s) estão relacionados aos fenômenos de absorção e espalhamento, respectivamente, e os índices *mol* e *aer*, por sua vez, indicam os processos moleculares e aerossóis, respectivamente. No processo de absorção molecular, os fótons são absorvidos pelos próprios componentes da atmosfera, fora das janelas de transmissão conhecidas; na absorção por aerossóis, esse processo é realizado por partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera com distribuições aleatórias, tais como poeira, poluição, nevoeiro, neve, entre outros. Na janela atmosférica do infravermelho próximo e médio, a qual é normalmente

empregada em enlaces FSO, a absorção molecular mais comum ocorre devido às moléculas de H₂O, CO₂, O₂ e O₃. Um espectro de absorção típico é mostrado na figura 2. Os estados vibracionais e rotatórios da energia destas moléculas possibilitam absorção em várias faixas do espectro. As janelas mais conhecidas estão entre 0,72 e 1,50 μm, algumas com limites estreitos. A região de 0,7 a 2,0 μm, por sua vez, é dominada pela absorção do vapor de água, visto que a região de 2,0 a 4,0 μm é dominada por uma combinação da água e do dióxido de carbono [2].

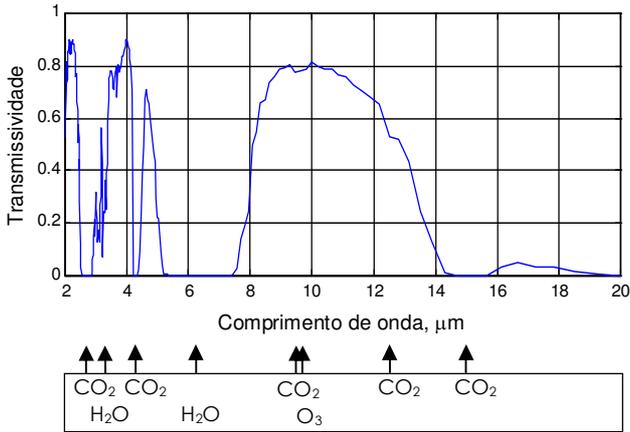


Fig. 2: Espectro de absorção típico da atmosfera.

Considerando o trecho da atmosfera no qual o enlace está inserido como um meio homogêneo, compostos por átomos e moléculas, além de uma determinada concentração de partículas em suspensão, pode-se associar a esse percurso um determinado índice de refração complexo n , $n = n' + jn''$. A parte imaginária do índice de refração, n'' , é relacionada ao coeficiente de absorção, $\alpha^{(a)}$, pela equação:

$$\alpha^{(a)} = \alpha_{aer}^{(a)} + \alpha_{mol}^{(a)} = \frac{2\pi n''}{\lambda} = \sigma N \quad (4)$$

onde σ é a seção transversal de absorção, em [metro²], e N é a concentração das partículas absorventes [partículas/metro³]. Em outras palavras, o coeficiente de absorção é uma função da força de absorção de um dado tipo de partícula, bem como da sua densidade.

Nos comprimentos de onda normalmente empregados em enlaces FSO (entre 780 e 1550 nm), a atenuação por espalhamento Rayleigh é desprezível em relação a outros efeitos de espalhamento. Isso se deve ao fato de que as partículas em suspensão na atmosfera têm dimensão da mesma ordem ou maior que os comprimentos de onda citados. Dessa maneira, o coeficiente de atenuação é dominado fundamentalmente pelo espalhamento Mie, que de acordo com o modelo de Kim [3], permite definir os termos

$\alpha_{mol}^{(s)}$ e $\alpha_{aer}^{(s)}$ de (3) através de:

$$\alpha_{mol}^{(s)} \approx 0$$

$$\alpha_{aer}^{(s)} \approx \frac{3,912}{V} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q} \quad (5)$$

onde:

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

e V corresponde à visibilidade (em km) da atmosfera na região do enlace. O parâmetro V é um dado que está disponível nos serviços nacionais de controle do tempo e pode ser usado para calcular a disponibilidade do enlace para uma região geográfica particular, levando em conta sua distribuição histórica.

A tabela I resume valores típicos de atenuação atmosférica em função da visibilidade, para os comprimentos de onda de 785 e 1550 nm [3].

TABELA I: VALORES DE ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA EM FUNÇÃO DA VISIBILIDADE E DO COMPRIMENTO DE ONDA

Visibilidade (km)	dB/km (785 nm)	dB/km (1550 nm)	Tempo
0,05	340	340	
0,2	85	85	Nevoeiro
0,5	34	34	
1	14	10	Nebolina
2	7	4	Névoa úmida
4	3	4	
10	1	0,4	
23	0,5	0,2	Limpo

Efeitos caóticos ocasionados por turbulência da atmosfera também são fontes de atenuação para o laser propagante. Os três principais fenômenos turbulentos são a cintilação, *beam wander* e *beam spreading*; a natureza destes fenômenos e os efeitos sobre o desempenho do enlace serão objeto de um estudo a parte.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

A. Taxa de Erro de Bit (BER)

Um dos conceitos fundamentais na avaliação de um enlace digital é a taxa de erro de bit, ou BER (*Bit Error Ratio*), que corresponde à razão entre o número de bits errôneos

recebidos e o volume total de bits transmitidos. Particularizando o caso mais simples, que considera um enlace FSO do tipo OOK (*On-Off Keying*), IM-DD (Modulação de Intensidade – Detecção Direta) e SISO (*Single-Input, Single-Output*), a BER pode ser avaliada através da expressão [4]:

$$P_{err} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right) \quad (6)$$

onde:

$$\operatorname{erfc}(x) = (2\pi)^{-1/2} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt, \quad e \quad (7)$$

SNR é a relação sinal-ruído no detector, definida por:

$$SNR = \frac{i_s^2}{2qi_s\Delta f + 4kT\Delta f/R} \quad (8)$$

onde i_s^2 é a magnitude do ruído balístico (*shot*) presente no detector, q é a carga de repouso do elétron, Δf é a largura de banda, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta e R é a impedância de carga. Uma análise detalhada da equação (6) mostra que o canal atmosférico e o dispositivo de detecção têm influência direta sobre a SNR do sistema e, por conseguinte, sobre a BER.

B. Margem e alcance do enlace

A margem (operacional) do enlace é definida como a razão (em dB) entre a mínima potência óptica necessária para manter um determinado desempenho (geralmente, um determinado valor de BER) e a potência necessária para operar o enlace em condições não-ideais, como por exemplo, sob influência de neblina e chuva. Outra definição, desta vez envolvendo SNR , é expressa matematicamente através de:

$$M = 10 \log \left(\frac{SNR}{SNR_0} \right) \quad (9)$$

onde M é a margem do enlace, em dB, e SNR_0 é a relação sinal-ruído para uma determinada taxa de erro de bit, calculada a partir de (6). Nestas condições, o alcance máximo do enlace, R_{max} , é calculado através de:

$$R_{max} = M/\alpha \quad (10)$$

C. Simulações Numéricas

Para as simulações numéricas, foram consideradas as perdas geométricas devido à propagação do feixe óptico, considerado gaussiano, e o trecho atmosférico em que o enlace está inserido foi postulado homogêneo e com perdas.

As perdas geométricas são incluídas na lei de Beer-Lambert através do fator K_{geo} , dado por [5]:

$$K_{geo} = \frac{4A}{\pi(\theta R)^2} \quad (11)$$

onde A é a área da lente do receptor e θ é a divergência do feixe, em radianos. Logo, pode-se reescrever (1), obtendo-se:

$$P(R) = P(0) K_{geo} e^{-\alpha R} \quad (12)$$

Na figura 3 está representado o gráfico de (8), no qual foram consideradas distâncias de enlace de 100 m e 1 km, $P(0) = 100$ mW, $\lambda = 785$ nm, $\theta = 2$ mrad, $\Delta f = 1$ GHz e a responsividade do fotodetector foi postulada 0,45 A/W, com 75% de rendimento de conversão para o comprimento de onda de interesse.

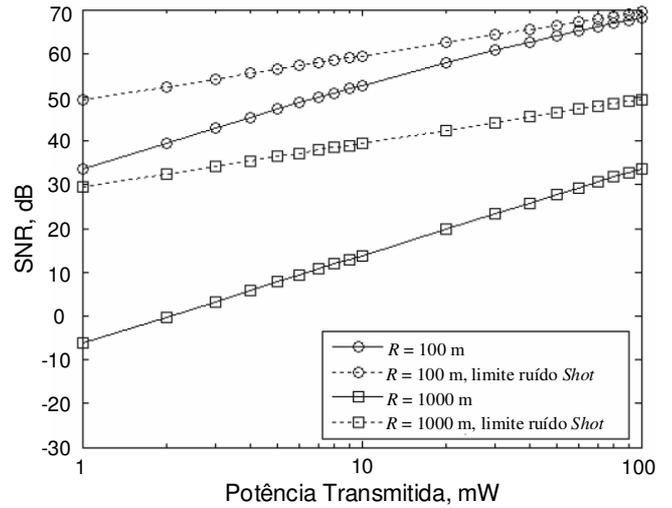


Fig. 3: Desempenho da SNR em relação à potência óptica transmitida, parametrizada em relação à distância R .

Utilizando os mesmos parâmetros do enlace, calculou-se a BER (6) em função da SNR , para as técnicas OOK-RZ (*Return to Zero*) e NRZ (*Non-Return to Zero*).

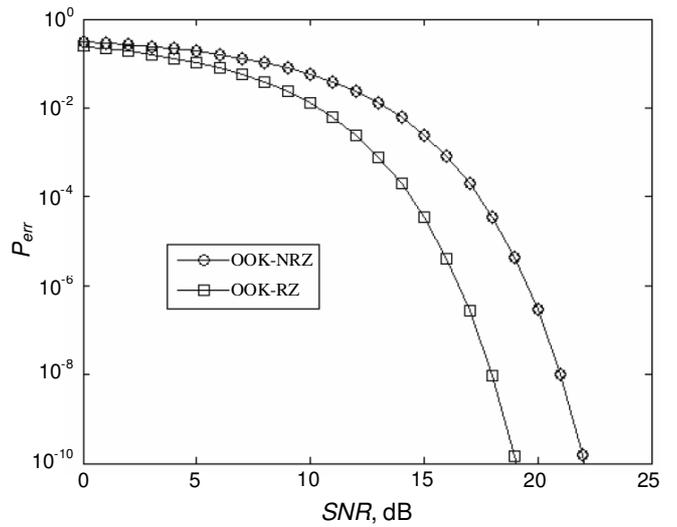


Fig. 4: Desempenho da BER (P_{err}) em função da SNR , para os esquemas OOK NRZ e RZ.

A fim de manter o enlace com certo grau de disponibilidade, a BER deve ser, em princípio, melhor que 10^{-9} , o que pressupõe uma relação sinal-ruído superior a 18 dB. Ressalta-se, por fim, que os efeitos de turbulência atmosférica e precipitações meteorológicas têm significativa influência sobre a *SNR* e a BER do enlace; maiores informações a esse respeito são apresentadas em [6] e [7].

VI. APLICAÇÃO

Os atuais níveis de disponibilidade de sistemas FSOC, em função da alta dependência que apresentam em relação às condições de tempo diversas, têm limitado severamente a aplicação militar desta tecnologia. Entretanto, nas situações de emprego que requerem rápido desdobramento dos meios e interconexões entre os nós de uma rede, enlaces FSO são perfeitamente utilizáveis como uma solução provisória. Cabe ressaltar novamente a alta segurança intrínseca da tecnologia FSO, já mencionada no início deste artigo.

A aplicação militar mais realista prevê o emprego temporário de um enlace óptico FSO entre duas posições de uma determinada força (como, por exemplo, o Posto de Comando – PC, e a Área de Apoio Logístico, A Ap Log), como meio de comunicações inicial, figura 5. Enlaces físicos (fibra óptica, par trançado, telefonia e dados ADSL, etc.) seriam lançados à medida que o cenário tático evolui. Eventualmente, não será possível a instalação de tais meios, e enlaces seguros de microondas poderão entrar em funcionamento, caso o ambiente eletromagnético assim o permita.

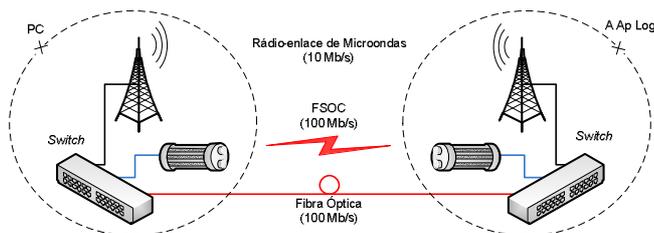


Fig. 5: Emprego de enlace FSO como solução inicial e redundância de meios de comunicações entre duas posições de uma força.

Sistemas FSO híbridos, os quais se caracterizam pelo fato de incorporar um transceptor de microondas no mesmo *setup* do dispositivo óptico, são realidades comerciais e proporcionam, via de regra, uma disponibilidade maior do enlace. A comutação do modo de operação óptico para operação em RF ocorre à medida que a *SNR* atinge determinado valor crítico, comprometendo a BER, como foi

demonstrado. Uma dessas soluções, comercializada pela empresa BeamWave[®], está ilustrada na figura 6.



Fig.6: Sistema Híbrido comercializado pela BeamWave[®]. Observa-se o transceptor de RF de 60 GHz e a caixa de comutação instalada junto ao sistema FSO original [8].

Novas técnicas, como a o uso de múltiplos transmissores e receptores [9], operação com detecção coerente [10], entre outras, têm aumentado consideravelmente a disponibilidade e o alcance destes sistemas, permitindo o emprego cada vez maior como enlace principal em sistemas de comunicações.

Por fim, ressalta-se a intensa pesquisa a respeito de sistemas FSO, que ocorre simultaneamente no meio acadêmico e industrial. Esse interesse demonstra a grande potencialidade dessa tecnologia, no sentido de prover largura de banda elevada, segurança e rapidez de instalação. O emprego em operações militares é uma apenas uma das potenciais aplicações sugeridas para a tecnologia FSOC.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi apresentada uma visão geral da tecnologia de comunicação óptica em espaço livre, FSO. Foi mostrada a equação do enlace, definida pela lei de Beer-Lambert, e a influência do canal atmosférico sobre o desempenho, este último quantificado pela relação sinal-ruído (*SNR*) e a taxa de erro de bit (BER). Por fim, foi apresentada uma aplicação potencial da tecnologia em comunicações militares, interligando temporariamente duas posições distintas de uma determinada força e servindo como enlace redundante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Exército Brasileiro e à Força

Aérea Brasileira, que através do Centro Integrado de Guerra Eletrônica e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica, respectivamente, prestam indispensável apoio a presente linha de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] DODLEY, J. P., et al. Free Space Optical Technology and Distribution Architecture for Broadband Metro and Local Services. **Proceedings of SPIE**, v. 4214, pp. 72-85 – Optical Wireless Communications, 2001.
- [2] SMITH, F. G. (editor). **Atmospheric Propagation of Radiation - The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Vol. 2**. SPIE, 1993.
- [3] KIM, I., MCARTHUR, B., KOREVAAR, E. Comparison of LASER beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. San Diego. <http://www.opticalaccess.com>, 2005.
- [4] AGRAWALL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. Wiley Interscience, 2ª ed, 1992.
- [5] CHABANNE M., et al. A new quality FSO software. **Proceedings of SPIE**, Strasbourg, 2004.
- [6] ZHU, X., KAHN, J. M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels. **IEEE Trans. Commun.** v. 50, no. 8, pp. 1293–1300, 2002.
- [7] AWAKA, et al. Millimeter and optical wave propagation experiments under snow, fog and rain conditions at Akita. **J. CRL**, v. 38, pp. 645-659, 1991.
- [8] BEAMWAVE. Hybrid FSO Systems. Disponível em: http://www.freespaceoptic.com/hybrid_fso_rf.htm. Acesso em: 15 jul 2007.
- [9] Kim, I. et al. Scintillation reduction using multiple

transmitters. **Proceedings of SPIE**, v. 2990, February 1997.

- [10] KIASALEH, K. Performance of coherent DPSK free-space optical communication systems in K-distributed turbulence. **IEEE Transactions on Communications**, v. 54, PP. 604-607, 2006.

AUTORES

O 1º Tenente de Comunicações Braulio Fernando R Sakamoto é oficial da arma de Comunicações, formado pela Academia Militar das Agulhas Negras, em 2001. Possui os cursos básicos de Guerra Eletrônica do Exército e da Força Aérea Brasileira, é Mestre em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, área de Microondas e Optoeletrônica, e atualmente desempenha a função de instrutor no Centro Integrado de Guerra Eletrônica do Exército, em Brasília – DF.

Willian Fegadolli é engenheiro de Telecomunicações formado pela Faculdade Salesiano, em Araraquara – SP. Atualmente, realiza mestrado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, área de Microondas e Optoeletrônica.

José Edimar Barbosa Oliveira é engenheiro elétrico, opção Eletrônica, formado pela Universidade de Brasília – DF. Possui os títulos de Mestre em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, em 1980, e Ph.D pela McGill University, em 1988 no Canadá. Atualmente, é professor titular e chefe da Pós-Graduação da Divisão de Engenharia Eletrônica e Computação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, em São José dos Campos – SP.