

**José Alberto Huanachín Osorio**

**Simulação e desenvolvimento de um enlace  
de 'Free-Space Optics' no Rio de Janeiro e a  
relação com a ITU-T G826**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Programa de Pos-Graduação em Telecomunicações**

Rio de Janeiro

Julho de 2005

**José Alberto Huanachín Osorio**

**Simulação e desenvolvimento de um enlace de  
'Free-Space Optics' no Rio de Janeiro e a relação  
com a ITU-T G.826**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Abelardo Podcameni

Rio de Janeiro  
Julho de 2005



**José Alberto Huanachín Osório**

**Simulação e desenvolvimento de um enlace  
de 'Free-Space Optics' no Rio de Janeiro e a  
relação com a ITU-T G826**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

**Dr. Abelardo Podcameni**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Dr. Antonio Dias de Macedo Filho**

Marinha do Brasil

**Dr. Gláucio Lima Siqueira**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Dr. Marbey Manhães Mosso**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de Julho de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **José Alberto Huanachín Osorio**

Graduou-se em Engenharia Elétrica, ênfase em Eletrônica no Centro Federal de Educação Tecnológica “Celso Suckow da Fonseca” em 2001. Fez parte do grupo de desenvolvimento de placas de roteamento para a detecção de partículas de altas energias no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (2000-01). Na PUC-Rio, interessou-se pela área de Microondas, Fibras Ópticas e Comunicação de Dados por Laser.

#### Ficha Catalográfica

Osorio, José Alberto Huanachín

Simulação e desenvolvimento de um enlace de “Free-Space Optics” no Rio de Janeiro e a relação com a ITU-T G.826 / José Alberto Huanachín Osorio ; orientador: Abelardo Podcameni. – Rio de Janeiro : PUC, Centro de Estudos em Telecomunicações, 2005.

107 f.: il ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro de Estudos em Telecomunicações.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Free Space Optics. 3. Última milha. 4. Taxa de erro bits (BER). 5. Recomendação ITU-T. 6. G.826. 7. SONET. 8. SDH. 9. Enlace óptico no Rio de Janeiro. I. Podcameni, Abelardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro de Estudos em Telecomunicações. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

Atingir um novo patamar na formação profissional é uma tarefa muito difícil se não se conta com um apoio inicial. Neste primeiro parágrafo deixo os nomes dos professores José Ricardo Bergmann e Flavio Hasselmann pelo primeiro apoio na PUC.

A meu orientador Abelardo Podcameni, pelo apoio e estímulo no assunto do Free-Space Optics, uma pessoa que esteve sempre me deu ânimo para concluir com êxito este trabalho inovador; e ao professor Marbey Manhães Mosso, pela oportunidade oferecida para conhecer e trabalhar com a tecnologia do FSO.

Não posso deixar de agradecer a duas pessoas que me proporcionaram informações dos estudos mais avançados e detalhados no mundo do FSO: Jennifer C. Ricklin, membro da Army Research Laboratory e Olga Korotkova, doutoranda na Universidade Central da Florida.

Aos amigos do Cetuc PUC-Rio: Bruno Guedes, Henrique, Richard, Luis Antonio, Armindo e Rogério; e Pedro Vladimir.

A Maria Lucia Junqueira, bibliotecária do Departamento do Cetuc.

A minha família, meus pais e meus irmãos, em Lima – Peru, que, apesar da distância e do tempo, sempre estiveram comigo nestes anos.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais, este trabalho não poderia ter sido realizado.

## In The **Fog**

It's strange to wander in the **fog**!  
A lonely bush, a lonely stone,  
No tree can see the other one,  
And one is all alone.

The world was full of friends back than,  
As life was light to me;  
But now the **fog** has come,  
And no one can I see.

Truly, no one is wise,  
Who does not know the **dark**  
Which inevitably and silently  
Does from others him part.

It's strange to wander in the **fog**!  
Life is loneliness  
No Man knows the other one,  
And one is all alone.

[Hermann Hesse]

**A mi familia**

## RESUMO

Osório, José Alberto Huanachín; Podcameni, Abelardo. **Simulação e desenvolvimento de um enlace de “Free-Space Optics” no Rio de Janeiro e a relação com a ITU-T G.826**. Rio de Janeiro, 2005. 107p. Dissertação de Mestrado – Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas de comunicações ópticas no espaço livre (*Free Space Optics* – FSO) tem sido desenvolvidos nos últimos anos no Brasil, contudo ha poucas referencias de estudos realizadas em território nacional. Neste tipo de sistema, um feixe de laser pode carregar informação de um ponto para outro através de uma distância curta (3-4 km), evitando-se o uso das fibras ópticas. Por tanto, FSO tornou-se uma alternativa rápida e muito econômica, principalmente nas áreas urbanas. Este trabalho apresenta um procedimento para a análise, modelamento, e um teste experimental do Free-Space Optics (FSO) é apresentado; sendo realizado dentro do perímetro urbano da cidade do Rio de Janeiro, em 2002. Inicialmente, as características do transmissor e do receptor foram consideradas. Adicionam-se três parâmetros: a perda atmosférica, a perda geométrica e a cintilação. Subseqüentemente, todas as perdas, incluindo outros parâmetros que tratam das perdas adicionais foram expressas em dB e inseridas em uma equação de balanço de potência. A disponibilidade do sistema de FSO é exibida, usando os dados de visibilidade de dois aeroportos, e conduzindo a uma predição sistemática da disponibilidade. Uma atenção especial é focalizada no parâmetro da taxa de erro de bits (BER), que está relacionada com a Recomendação ITU-T G.826. Dentro esta última recomendação, é possível realizar uma análise do FSO com relação à variação climática. A experiência abrangeu períodos curtos em que o Rio de Janeiro apresentou uma névoa forte da manhã. Mostra-se, finalmente, que FSO é uma tecnologia competitiva e confiável na transmissão, desde que seja usada de forma correta e apropriada.

## Palavras-chave

Free Space Optics.; última milha; taxa de erro bits (BER); recomendação ITU-T; G.826; SONET; SDH; enlace óptico no Rio de Janeiro.

## ABSTRACT

Osório, José Alberto Huanachín; Podcameni, Abelardo (Advisor). **Simulation and development of a “Free-Space Optics” in Rio de Janeiro and relationship with ITU-T G.826.** Rio de Janeiro, 2005. 107p. MSc. Dissertation – Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Very few works had been developed in Brazil, dealing with Free-Space Optics (FSO). In this arrangement, a laser beam carries information for a short range (up to 3-4 km), avoiding the use of optical fiber. FSO is a rapidly-improved solution and very economical, specifically in urban areas. In this work a FSO system operating in Rio is described. This work presents a procedure for the analysis, modeling, and a practical trial of a Free-Space Optics (FSO) system is presented. The procedure has been conducted in the urban area of Rio de Janeiro, in 2002. Firstly, the transmitter and receiver characteristics are considered. Next, three additional parameters are introduced: atmospheric loss, geometric loss and scintillation. In this last parameter, a few ways how scintillation might be expressed in dB and translated into a power balance equation, it presents. Other fixed parameters, dealing with additional losses, are subsequently inserted. The FSO system availability is exhibited, using airports visibility data, leading to a prediction of the systemic availability. Attention is then focused on the Bit Error Rate, BER, which relates with the Recommendation ITU-T G.826. Within this last Recommendation, it shows how to perform a FSO analysis with respect to the climatic variation. The experiment has encompassed some short periods in which this city presents a strong morning fog. It is finally shown that FSO is a competitive and reliable transmission technology, provided proper and correct use.

## Keywords

Free-space optics; last mile, bit error rate; recommendation ITU-T; G.826; optical link in Rio de Janeiro.



# Sumário

1. Introdução	18
1.1. Histórico do FSO e as suas aplicações	18
1.2. Vantagens e desvantagens	19
1.3. Conteúdo da dissertação	22
2. Parâmetros e Balanço de Potência do FSO	24
2.1. Transmissor e Receptor	24
2.2. Perda Atmosférica	25
2.2.1. Características iniciais	25
2.2.2. Atenuação Atmosférica	32
2.3. Perda do Espalhamento Geométrico	33
2.4. Perda por Cintilação	34
2.4.1. Estudos iniciais sobre a cintilação	34
2.4.2. Valores experimentais	39
2.5. Outras perdas do enlace FSO	45
2.6. Balanço de potência do FSO	46
2.7. Obtenção dos valores de FSO	46
2.8. Resumo do Capítulo 2	50
3. Disponibilidade do FSO	51
3.1. Recomendação ITU-T G.826	59
3.1. Resumo do Capítulo 3	62
4. Resultados	64
4.1. Resultados Experimentais	64
4.2. Resumo do Capítulo 4	70
5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.	71
5.1. Sugestões para determinar um mapa de visibilidade na cidade de Rio de Janeiro	73

Bibliografia.	76
Anexo A. Distribuição de Probabilidade LogNormal.	81
Anexo B. Relação entre a variância da amplitude logarítmica e a variância da intensidade logarítmica.	85
Anexo C. Valores para o parâmetro da Cintilação.	89
Anexo D. Tabela de Disponibilidade (%) vs. Visibilidade (milhas / km).	93
Anexo E. Contribuição original do Autor. "SIMULATION AND DEVELOPMENT OF A FSO SYSTEM AT AN URBAN ENVIRONMENT IN RIO DE JANEIRO"	95

## Lista de figuras

Figura 1.1 - Exemplo de uma rede metropolitana de FSO	21
Figura 1.2 - Esquema simplificado de um enlace FSO	22
Figura 2.1 – FSO TX – RX da LightPointe	25
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.	26
Figura 2.3 - Diagrama de espalhamento Rayleigh (a), Mie (b) e por óptica 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.	27
Figura 2.4 – Janelas atmosféricas em vários comprimentos de onda e submetido a vários elementos atenuadores [23].	28
Figura 2.5 - Fator da eficiência do espalhamento vs. raio de uma partícula.	28
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).	30
Figura 2.7 - Perda do espalhamento geométrico	33
Figura 2.8 - Comportamento do feixe de laser através do espaço livre.	34
Figura 2.9 – Dependência da variância da distribuição lognormal $C_\lambda(0)$ vs. diâmetro da abertura no receptor [15].	35
Figura 2.10 - Comportamento experimental do $C_n(a)$ e a sua relação com o desvio padrão da amplitude logarítmica $s_\gamma$ (b-e) calculado para os comprimentos de 50, 310, 500 e 1000m de comprimento, num período de 24 h [26].	37
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.	39

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.	40
Figura 2.13 - Diferença da perda da cintilação entre a eq. 2.13 e a eq. 2.16.	42
Figura 2.14a - Perda por cintilação - 785 e 850 nm - abertura do receptor de 10 cm.	43
Figura 2.14b - Perda por cintilação - 785 e 850 nm - abertura do receptor de 20 cm.	44
Figura 2.14c - Perda por cintilação - 785 e 850 nm - abertura do receptor de 25 cm.	44
Figura 2.14d - Perda por cintilação - 1550 nm - abertura do receptor de 20 cm.	45
Figura 2.15a – Gráfico geral da perda atmosférica vs. Visibilidade vs. Enlace do FSO em 785 nm.	47
Figura 2.15b – Gráfico geral da perda atmosférica vs. Visibilidade vs. Enlace do FSO em 850 nm.	47
Figura 2.15c – Gráfico geral da perda atmosférica vs. Visibilidade vs. Enlace do FSO em 1550 nm.	48
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.	49
Figura 3.1 – Relação entre a Visibilidade e o Enlace do FSO, nas frequências de 785, 850 e 1550 nm.	52
Figura 3.2 - Disponibilidade vs. Visibilidade observado no Aeroporto Santos Dumont	53
Figura 3.3 - Disponibilidade vs. Visibilidade observado no Aeroporto do Galeão	53
Figura 3.4 – Disponibilidade vs. Enlace do FSO (km). A figura mostra a provável disponibilidade de um enlace de FSO desde 0 até 8 km, perto do Aeroporto do Galeão. A área de 98 para 100 (alta disponibilidade) será apresentada adiante, na Figura 3.5	54

Figura 3.5 - Disponibilidade vs. Enlace do FSO. Além dos gráficos mostrando os índices de disponibilidade de um enlace de FSO desde 0 até 6 km, apresenta-se os valores de disponibilidade para o nosso enlace que foram medidos entre abril e agosto de 2002 perto do Aeroporto do Galeão.	57
Figura 3.6 – Período de Disponibilidade e Indisponibilidade[38].	58
Figura 3.7 – Alocação do FSO em um Hypothetical Reference Path [38].	60
Figura 3.8 – Bit-Error-Ratio Tester	62
Figura 4.1 - – Eventos de Erros no enlace FSO de 155 Mbps no dia 16 de junho de 2002.	65
Figura 4.2 – Plataforma do Analisador de Anomalias/Defeitos do BERT. O evento No. 2382 (evento LOS) tem uma duração de 38:53.1 minutos.	66
Figura 4.3 – Configuração utilizada na transmissão de dados do FSO	68
Figura 4.4 – Topologia do enlace FSO	69
Figura 5.1 – Topologia FITL utilizando FSO	72
Figura 5.2 - Áreas críticas de instalação de FSO no Rio de Janeiro. Passando da parte de baixo para acima pode-se observar: (a) – Um avião que mostra a posição do Aeroporto Santos Dumont (SD); (b) – Uma estrela indicando o local de testes de FSO; (c) – outro avião exibindo a localização do Aeroporto Internacional Antonio Carlos Jobim (ACJIA) . Existem áreas críticas que influenciarão no enlace de FSO, como a Av Brasil, e a Zona Sul (principalmente Copacabana). A escala na figura é de 4 km por centímetro.	75

## Lista de tabelas

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.	31
Tabela 3.1 – Registro de Anomalias e Erros emitido por um BERT (Bit Error Rate Tester) na qual foram apresentadas os parâmetros da Recomendação ITU-T G.826 para um enlace de FSO na taxa de 155 Mbps.	55
Tabela 3.2 – Disponibilidade anual para sistemas FSO, climas e comprimentos de enlaces. Estes dados foram baseados em enlace de FSO de 500 m, 40 dB de margem e 125/155 Mbps	56
Tabela 4.1 – Eventos de Erros no enlace FSO de 155 Mbps no dia 16 de junho do 2002.	65

## Lista de Abreviaturas

ANSI	American National Standards Institute.
APD	Avalanche Photo Diode.
B1	Section bit-interleaved parity code (BIP-8) byte.
B2SUM	Conjunto de bytes que oferecem uma linha de monitoração de erros
B3	STS path bit-interleaved parity code (path BIP-8) byte.
BBE	Bloco de <i>background</i> errado
BER	Bit-Error Rate.
BERT	Bit-Error Rate Tester
BSC	Base Station Controller.
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing.
EB	Período com blocos errados.
EFS	Período de 1 segundo sem nenhum bit errado.
ERB	Estações Radio Base.
ES	Período de 1 segundo com um ou mais bits errados
FITL	Fiber Into The Loop
FSO	Free Space Optics.
FWHM	Full Width at Half Maximum.
HRP	Hypothetical Reference Path.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
ITU	International Telecommunication Union.
G.821	Recomendação da ITU-T G.821
G.826	Recomendação da ITU-T G.826
LOF-STM	Loss of Frame STM.
LOS	Loss of Signal.
LSS	Loss of sequence synchronization.
Mbps	Megabits por Segundo
O-E-O	Optical-to-Electrical-to Optical
OOF	Out of Frame.
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy.

SDH	Synchronous Digital Hierarchy.
SES	Segundo com 30% de bloco errado.
SONET	Synchronous Optical NETwork.
STM	Synchronous Transfer Mode
STS	Synchronous Transport Signal
TSE	Test Sequence Error.
UAS	Período de Indisponibilidade.
V.35	Padrão ITU-T para transmissão de dados (48 Kbps)
WDM	Wavelength Division Multiplexing.
WLAN	Wireless Local Área Network



## Lista de Símbolos

$C(r, I)$	Seção efetiva de uma partícula.
$C_n^2$	Parâmetro da estrutura do índice refrativo.
$I$	Irradiancia instantânea que chega ao receptor
$I_0$	Irradiancia media recebida.
$L_{Atm}$	Perda atmosférica.
$L_{Geo}$	Perda geométrica.
$L_{Misp}$	Perda por alinhamento.
$L_{RXOp}$	Perdas ópticas no receptor.
$L_{Scint}$	Perdas por cintilação.
MARGEM	Margem do enlace FSO.
$P(z)$	Pressão uma altura $z$ .
$P_{TX}$	Potência óptica no transmissor.
$P_{RX}$	Potência óptica no receptor.
$Q$	Fator da eficiência de espalhamento.
$R$	Comprimento do enlace.
$SA_R$	Superfície no receptor.
$SA_T$	Superfície no transmissor.
$T(x, z)$	Temperatura de um sensor.
$T(x + r, z)$	Temperatura de um segundo sensor
$V$	Visibilidade.
$k$	Número de onda ( $2\pi / \lambda$ )
$n_i$	Distribuição ou Concentração da $i$ -ésima partícula.
$r$	Raio de uma partícula
$q$	Ângulo de divergência de um feixe
$s$	Coefficiente de atenuação.
$s_\sigma$	Desvio padrão da amplitude logarítmica
$s_1^2$	Variância de Rytov.

- $s_l^2$  Variância normalizada das flutuações da irradiância
- $l$  Comprimento de onda em nm.