

Nova Técnica para a Medida da Constante de Estrutura para o Índice de Refração (C_n^2) em Sistemas de Transmissão Óptica no Espaço Livre

Vinicius Nunes Henrique Silva, Andrés Pablo López Barbero e Ricardo M. Ribeiro

Resumo— Esse trabalho apresenta uma nova técnica para a medição da turbulência atmosférica em enlaces ópticos no espaço livre (FSO). A técnica, baseada no rastreamento do feixe óptico no plano do detector, mede a constante de estrutura para o índice de refração (C_n^2), através do efeito de divagação do feixe (beam wander). Simulações numéricas, assim como medidas experimentais feitas em laboratório, demonstram a viabilidade do uso da técnica.

Palavras-chave— Turbulência atmosférica, divagação do feixe, constante de estrutura para o índice de refração, óptica no espaço livre, rastreamento do feixe óptico.

Abstract— In this paper a new technique to measure the atmospheric turbulence in horizontal optical links is presented. The technique uses the direct measurement of the beam wander effect to determine the refractive index structure constant (C_n^2) to evaluate the turbulence for a specific path. The mathematical theory and the experimental setup to demonstrate the new technique are described in this work.

Keywords— Atmospheric Turbulence, Beam Wander, Refractive Index Structure Parameter, Free Space Optics.

I. INTRODUÇÃO

As comunicações ópticas no espaço livre (FSO) é uma tecnologia de transmissão da informação pela atmosfera terrestre. Os sistemas FSO são ponto-a-ponto, seguros e apresentam taxas de transmissão equiparáveis as comunicações ópticas guiadas, e a custo relativamente baixo. A segurança associada a esta tecnologia, está ligada ao fato de que a interceptação, ou invasão do canal, somente pode ser feita através de um divisor de feixe colocado entre as cabeças, transmissora e receptora, em função da altíssima diretividade do transmissor óptico. Com respeito às dificuldades práticas desta forma de interceptação, esta tecnologia é mais segura que os sistemas em rádio frequência. O sistema é livre de

interferências eletromagnéticas, pois se utiliza da luz como portadora da informação. Além disso, não existe a necessidade de licenciamento pelos órgãos reguladores para a operação de enlaces em FSO. Adicionalmente, o sistema apresenta grande mobilidade, facilidade e rapidez na instalação. Apesar das dificuldades inerentes ao alinhamento das cabeças, transmissora e receptora, para distancias acima de 1000m, a implantação de um sistema FSO é muito mais rápido do que um sistema a fibra óptica, ou de rádio frequência caso haja a necessidade de autorização prévia no uso de determinada faixa de frequência.

Assim, O FSO surge como uma alternativa para as redes de acesso, solucionando para determinadas aplicações, o problema do gargalo da última milha [1].

No entanto, a luz ao se propagar pela atmosfera está sujeita a fenômenos aleatórios que deterioram a qualidade dos enlaces de comunicação em FSO. A turbulência atmosférica, um dos fatores responsáveis pela degradação da qualidade do sinal, acontece devido às variações de temperatura e pressão entre o transmissor e o receptor. Em consequência, ocorrem flutuações no valor do índice de refração do ar caracterizado pela constante de estrutura para o índice de refração (C_n^2). Os estudos teóricos, referentes à turbulência atmosférica, se iniciaram nas décadas de 60 e 70 e ainda apresentam algumas inconsistências quando correlacionados com arranjos e resultados experimentais [2]. Entretanto, espera-se que os sistemas de comunicação óptica no espaço livre operem satisfatoriamente, independente do grau de turbulência atmosférica. Mesmo com a lacuna teórica existente, testes e resultados empíricos ainda são as melhores formas de prover soluções para diminuir os efeitos destrutivos da turbulência atmosférica.

Algumas técnicas e equipamentos já foram utilizados e desenvolvidos para medir turbulência atmosférica, tais como: sensores de frente de onda Shack-Hartman [3], cintilômetros [4], câmeras CCD [2] e através da correlação entre dois feixes ópticos paralelos [5]. A técnica aqui proposta difere das demais técnicas presentes na literatura, pois se utiliza da medida do efeito da divagação do feixe óptico (*beam wander*) para a caracterização da turbulência atmosférica; pelo rastreamento do feixe óptico e posterior cálculo do C_n^2 . O rastreamento do feixe óptico no plano do receptor, em tempo real, permite o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo para o realinhamento do feixe quando necessário, aumentando a disponibilidade dos enlaces.

Vinicius Nunes Henrique Silva, Andrés Pablo López Barbero e Ricardo Marques Ribeiro, LACOP – Laboratório de Comunicações Ópticas, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Niterói, RJ, E-mail: {vinidelsilva, pablo, mnr}@telecom.uff.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

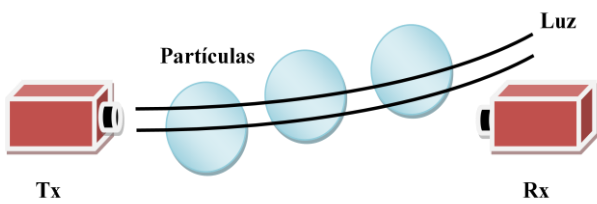


Fig. 1. Divergência do Feixe

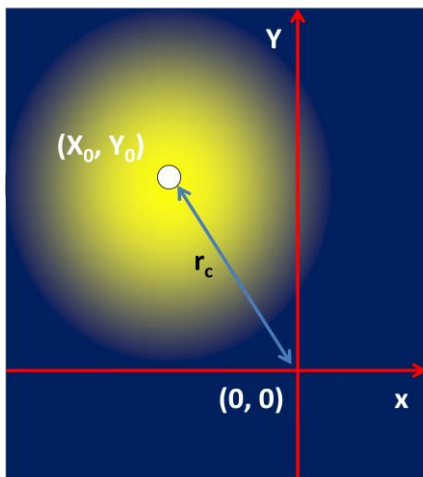


Fig. 2. Variação do deslocamento radial do spot luminoso ao centro de eixos coordenados.

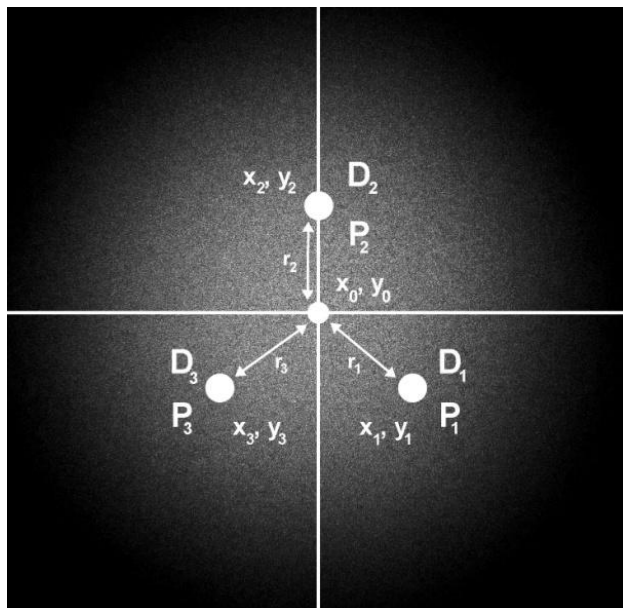


Fig. 3. Fotografia do feixe óptico gaussiano projetado no anteparo, utilizado para o rastreamento do feixe óptico, com os fotodetectores posicionados.

II. TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

A turbulência atmosférica é provocada pelo aquecimento da superfície da Terra. Essa energia absorvida eleva a temperatura do ar que está próximo da superfície aquecida. O ar aquecido diminui de densidade aparecendo correntes de convecção e consequentemente criando um meio turbulento. As variações de temperatura acabam provocando ligeiras flutuações no índice de refração do ar devido à forte relação entre essas

grandezas, que são caracterizadas e quantificadas pela constante de estrutura para o índice de refração C_n^2 e pela constante de estrutura de temperatura [6].

Um feixe de luz ao se propagar por essa atmosfera turbulenta sofre alterações nas suas características de propagação como: distribuição de potência, direção de propagação, variações na fase da onda, entre outros. Essas alterações provocam, principalmente, três efeitos degradantes aos sistemas em FSO: a cintilação, o *beam spread* e a divergência do feixe.

Em particular, a divergência do feixe ocorre quando a luz ao se propagar pela atmosfera terrestre se depara com partículas muito maiores que o diâmetro do spot luminoso, provocando um desvio na direção de propagação do feixe, como pode ser visto na Figura 1.

No plano do receptor, esse desvio da direção de propagação do feixe provoca uma variação da posição do spot luminoso em função do tempo. Sendo assim, defini-se o deslocamento radial instantâneo (r_c), em relação ao centro dos eixos coordenados, como sendo $r_c = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$, e visualizado na Figura 2.

Defini-se, quantitativamente, a divergência do feixe pela média quadrática do deslocamento radial do centro do feixe ao sistema de eixos coordenados pela Equação 1[7],

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42C_n^2 W_0^{-\frac{1}{3}} L^3 \quad (1)$$

onde, L e W_0 são comprimento do enlace e largura do spot luminoso, respectivamente. Neste formalismo, considera-se que a média da flutuação do valor do índice de refração da atmosfera é nula [7].

III. A TÉCNICA

A técnica se utiliza do efeito de divergência do feixe para o cálculo da constante de estrutura para o índice de refração. Através do rastreamento do centro do feixe óptico (x_0, y_0) no plano do receptor. Desta forma, calculando-se o deslocamento radial instantâneo (r_c), conhecendo o comprimento do enlace de comunicação (L) e a largura do spot luminoso (W), consegue-se, através da Equação 1, calcular a constante de estrutura para o índice de refração e determinar o grau de turbulência atmosférica.

A técnica consiste em utilizar, no plano do receptor, três fotodetectores ($D_{i=1,3}$) em posições fixas $(x_{i=1,3}, y_{i=1,3})$, como mostrado na Figura 3.

Através das medições das potências ópticas nos fotodetectores D_i ($P_{i=1,3}$), pode-se determinar a posição do centro do feixe (x_0, y_0) pela solução do sistema de equações 2 [8-9]:

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 - W_0(-\ln \bar{P}_1) = 0 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 - W_0(-\ln \bar{P}_2) = 0 \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 - W_0(-\ln \bar{P}_3) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

onde $\bar{P}_{i=1,3} = \frac{P_i}{P_0}$, e P_0 é a potência máxima no centro da gaussiana projetada no anteparo e descrita pela Equação 3:

$$P(r) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} \quad (3)$$

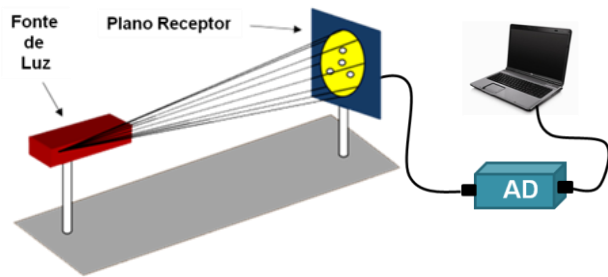


Fig. 4. Esquemático do arranjo experimental

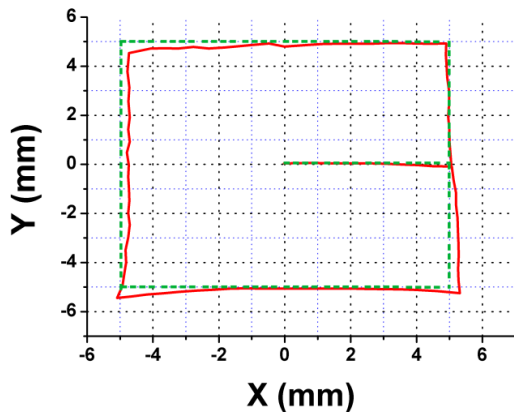


Fig. 5. Movimentação do plano receptor na forma de um quadrado de 10mm de lado. A linha tracejada e contínua mostra, respectivamente, o trajeto imposto ao anteparo e o rastreamento deste trajeto obtido aplicando a técnica aqui apresentada.

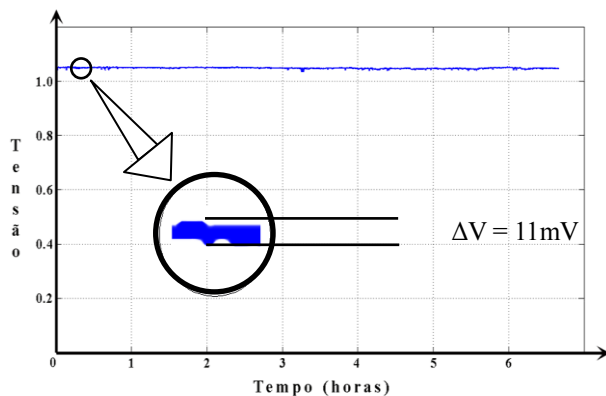


Fig. 6. Ruído de 11mV pico-a-pico no sistema de recepção.

IV. ARRANJO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Para a comprovação da técnica, desenvolveu-se em laboratório um arranjo experimental consistindo de uma fonte de luz, um plano receptor com os fotodetectores, um conversor analógico digital (AD) e um computador (PC). A fonte de luz projeta sobre o plano receptor um spot luminoso com distribuição gaussiana, conforme Equação 2. Com a fonte de luz a uma distância (L) do plano receptor, são medidas as potências ópticas incidentes ($P_{i=1,3}$) em cada fotodetector. Através do conversor analógico-digital, as tensões detectadas correspondentes às potências ópticas P_i , são transferidas para o PC, como mostra a Figura 4.

Por sua vez, o computador, ao receber os dados das potências ópticas em cada fotodetector, resolve o sistema de equações 2, e calcula a posição do centro do feixe óptico

gaussiano (x_0, y_0) . O feixe óptico gaussiano utilizado nas medições apresentava largura $W=15,77\text{mm}$, e uma tensão elétrica correspondente à potência óptica no centro do feixe de $786,1\text{mV}$. A posição dos fotodetectores no plano receptor, foram, em milímetros, $(-10,0026 ; -5,7550)$, $(0,00 ; 11,5500)$ e $(10,0026 ; -5,7550)$ para D_i ($i=1,3$), respectivamente.

Para a simulação do efeito de divagação do feixe, movimentou-se o plano receptor através de estágios de translação, que permitiam o deslocamento do plano na horizontal e na vertical. Uma das experiências consistiu em movimentar o spot óptico gaussiano na forma de um quadrado de lado 10mm.

Na Figura 5, em tracejado, tem-se o trajeto imposto ao feixe pela movimentação do anteparo através dos estágios de translação e, em linha contínua, o rastreamento deste trajeto obtido aplicando a técnica aqui apresentada. Na Figura, nota-se um desvio entre o valor esperado (linha tracejada) e o valor calculado (linha contínua). Essa divergência ocorre devido ao ruído elétrico presente no sistema, e pela folga nos estágios de translação. Averiguo-se o ruído elétrico presente no sistema de recepção através da medição da intensidade óptica em um dos fotodetectores ao longo de 6h, com o anteparo estático e, apresentando um valor de 11mV pico-a-pico de ruído (Figura 6).

Para caracterizar o erro provocado pelo ruído elétrico no cálculo da posição do centro do feixe gaussiano, simulou-se computacionalmente um ruído de 11mV pico-a-pico e, calculou-se as intensidades ópticas nos fotodetectores correspondentes a uma movimentação do feixe sobre uma reta, no anteparo, do ponto $(-20, -20)$ ao ponto $(20, 20)$, sem e com ruído. Essas intensidades foram usadas como dados de entrada no programa para solucionar o sistema de equações 2. Na Figura 7 é apresentado os resultados desta simulação.

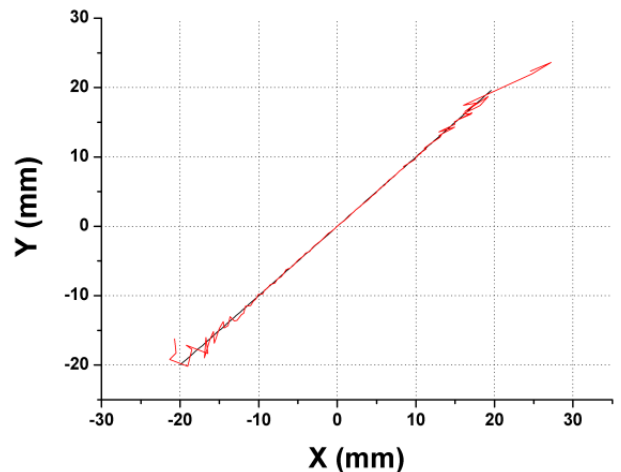


Fig. 7. Movimentação do feixe gaussiano com e sem a presença do ruído.

Em preto, o resultado do cálculo do rastreamento do centro do feixe óptico na ausência do ruído e, em vermelho, o resultado do rastreamento na presença do ruído. O erro absoluto do deslocamento radial (ϵ_{rc}), mostrado na Figura 8, é definido como a diferença entre a posição do centro do feixe óptico calculado na presença $(x_0, y_0)_{c/r}$ e na ausência do ruído $(x_0, y_0)_{s/r}$: $\epsilon_{rc} = \overline{(x_0, y_0)_{c/r}} - \overline{(x_0, y_0)_{s/r}}$.

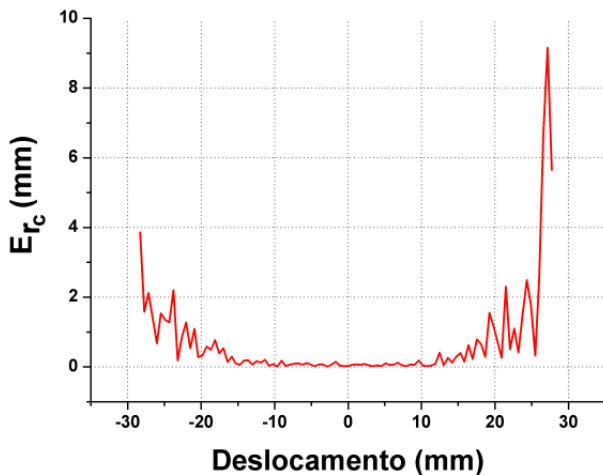


Fig. 8. Erro absoluto do deslocamento radial na medição da posição do centro da gaussiana devido ao ruído no sistema.

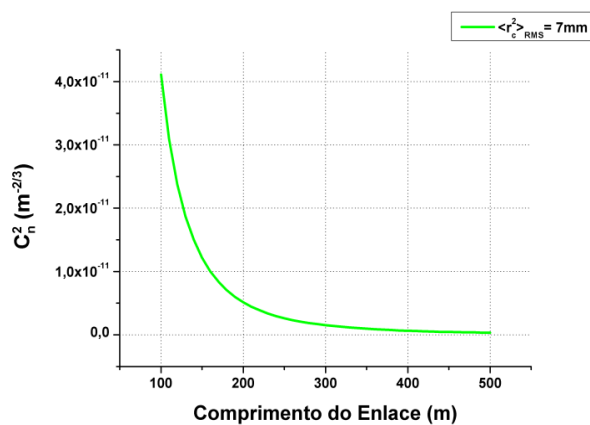


Fig. 9. Valores de C_n^2 que o sistema é capaz de medir em função do comprimento do enlace para um ruído de 11mV.

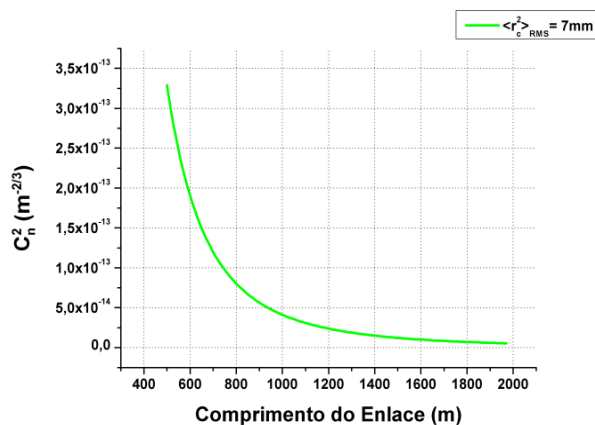


Fig. 10. Valores de C_n^2 que o sistema é capaz de medir em função do comprimento do enlace para um ruído de 11mV.

De acordo com o gráfico da Figura 8, para um erro máximo de 0,1mm tem-se um faixa dinâmica de deslocamento radial instantâneo do feixe de 10mm.

Para as condições experimentais obtidas, investigaram-se os valores de C_n^2 máximos, possíveis de serem medidos com o arranjo experimental desenvolvido em laboratório. Para isso,

por simplicidade, considerou-se que a divagação do feixe (deslocamento radial) ocorra como um movimento harmônico, de amplitude 10mm (faixa dinâmica de deslocamento radial instantâneo de nosso experimento) e com frequência de 1kHz [10]. Nestas condições pode-se representar matematicamente a movimentação do feixe gaussiano no plano receptor conforme a Equação 4:

$$r_c(t) = 10|\cos(2\pi \cdot 10^3 t)| \quad (4)$$

Calculando a variância do deslocamento radial do feixe $\langle r_c^2 \rangle$, obtêm-se 7,07mm como o valor máximo RMS do deslocamento radial do centro do feixe óptico que o sistema experimental é capaz de medir. Para uma gaussiana com largura fixa de $W=15,77\text{mm}$, no plano do receptor, e $\langle r_c^2 \rangle_{RMS} = \sqrt{\langle r_c^2 \rangle}$ pode-se determinar o valor máximo da constante de estrutura para o índice de refração em função da distância, para a largura de gaussiana citada acima, usando a Equação 1, conforme mostra a Figura 9-10:

Vale salientar, que nas Figuras 9 e 10 foi considerado, por facilidade de cálculo, que a largura do *spot* não varia em função da distância do enlace (feixe altamente colimado). Sendo assim, a C_n^2 máxima é o valor obtido considerando a largura do feixe gaussiano $W=15,77\text{mm}$ no plano receptor.

V. CONCLUSÕES

Em suma, os resultados acima, obtidos experimentalmente, mostram que mesmo na presença do ruído, a turbulência atmosférica pode ser medida através do efeito da divagação do feixe. Conhecendo a posição do feixe óptico no plano do receptor ao longo do tempo, pode-se, estatisticamente, determinar a variância do deslocamento radial do centro do feixe ao centro de eixos coordenados e, através da Equação 1, obter a constante de estrutura para o índice de refração. O rastreamento é feito pela localização do centro da gaussiana através das medições das intensidades ópticas e das posições relativas em cada fotodetector no plano do receptor. Com um sistema simples e de baixo custo que pode ser instalado nos equipamentos de óptica no espaço livre aumentando a eficiência dos sistemas de comunicação em FSO.

AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem ao CNPQ (482657/2007-3), CAPES e o Ministério da Defesa o qual financiou o projeto através do Projeto Pró-Defesa.

REFERÊNCIAS

- [1] V. Ramasarma, "Free Space Optics: A Viable Last-Mile Solution". Bechtel Telecommunications Technical Journal, v. 1, pp. 22-30, Dezembro 2002.. 2007, pp. 19-22.
- [2] H. Yuksel e C. C. Davis, "Aperture Averaging Experiment for Optimizing Receiver Design and Analyzing Turbulence in Free Space Optical Communication Links". Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO), 2005.
- [3] G. D. Love et al, "Horizontal turbulence measurement using SLODAR".
- [4] C. Jiménez, "Understanding the atmospheric turbulence structure parameter C_n^2 , in the littoral regime". Dissertação de Mestrado, Universidade de Porto Rico, 2006.

- [5] A. Consortini e K. O' Donnel, "Beam wandering of thin parallel beams through atmospheric turbulence". *Waves in Random Media*, v. 3, pp. 11-28, 1991.
- [6] G. Segatto, "Modelamento e Análise de Desempenho de Sistema de Transmissão Óptica pela Atmosfera". Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1996
- [7] L. C. Andrews e R. L. Philips, "Laser Beam Propagation through Random Media". SPIE Press, 2005.
- [8] V. N. H. Silva, A. P. L. Barbero e R. M. Ribeiro, "Experimental Development of a New Technique to Measure Atmospheric Turbulence in Horizontal Optical Links Through Free Space". *International Workshop On Telecommunication*, Fevereiro 2009
- [9] V. N. H. Silva, "Desenvolvimento Experimental de uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, 2009.
- [10] W. Heinz, G. Baksheesh. *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Sams, 2001.