

# Técnicas de diversidade para enlaces ópticos no espaço livre sujeitos à turbulência atmosférica: uma perspectiva teórica

Vanessa Galdino Mendes de Farias <sup>[1]</sup>, Paulo Ribeiro Lins Júnior <sup>[2]</sup>, Marcelo Sampaio de Alencar <sup>[3]</sup>

[1] vanessagaldino.mf@gmail.com. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PpgEE, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. [2] paulo.ribeiro.lins.jr@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus Campina Grande. [3] malencar@iecom.org.br. Instituto de Estudos Avançados em Comunicações – Iecom, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

## RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão das técnicas de diversidade aplicadas para comunicação óptica no espaço livre na presença de turbulência. Para isto, são revisadas as literaturas mais recentes que tratam da utilização do enlace óptico no espaço livre sujeito à turbulência atmosférica em conjunto com técnicas de diversidade espacial, temporal e de comprimento de onda e apresentados os resultados obtidos pelos autores com esses esquemas.

**Palavras-chave:** Enlaces ópticos no espaço livre. Turbulência atmosférica. Modulação. Técnicas de diversidade.

## ABSTRACT

*This paper presents an overview of diversity techniques applied to wireless optical communications in the presence of turbulence. For this are shown the most recent literature dealing with the use of the free space optics communication subject to atmospheric turbulence with spatial diversity techniques, time and wavelength and are shows the results obtained by authors with these schemes.*

**Keywords:** *Free Space Optics. Atmospheric turbulence. Modulation. Diversity technique.*

## 1 Introdução

A comunicação óptica no espaço livre (FSO – *Free Space Optics*) tem avançado como uma tecnologia promissora para a próxima geração de redes de banda larga sem fio (KAZEMLOU *et al.*, 2011) e tem se tornado uma possível alternativa aos tradicionais sistemas de radiofrequência e fibras ópticas (KAZEMLOU *et al.*, 2011; BORAH *et al.*, 2012). No entanto, é importante que o projetista conheça os efeitos que poderão influenciar o adequado funcionamento do sistema FSO.

Os principais problemas nas comunicações ópticas no espaço livre são ocasionados principalmente por abalos nas estruturas em que estão instalados os enlaces ópticos, atenuação ocasionada por espalhamento e/ou absorção e desvanecimento do feixe ocasionado por turbulência, por meio do efeito de cintilação (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013). Algumas técnicas podem reduzir os efeitos. No primeiro problema, podem ser utilizados mecanismos de apontamento e rastreamento ou mesmo alargamento do feixe de luz, com aumento da potência transmitida.

Os espalhamentos podem ser evitados em situações de céu limpo e com a utilização de redundâncias em situações de forte nevoeiro, e há determinados comprimentos de onda que, se utilizados, evitam as janelas de absorção (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013). Essas técnicas são largamente discutidas na literatura (KIM *et al.*, 1998; KIM *et al.*, 2001; IJAZ *et al.*, 2012).

Em relação às turbulências, mesmo com a transmissão em céu limpo, o enlace estará sujeito a este efeito, que pode causar desvanecimento do feixe de luz, ocasionado pelas flutuações de fase e irradiância. As técnicas tradicionais mais utilizadas para reduzir a influência desse efeito têm sido a diminuição do enlace e o aumento da potência óptica transmitida. No entanto, essas técnicas são limitadas, pois a potência máxima permitida a ser utilizada pode não ser suficiente para manter o enlace funcionando em situações de forte turbulência, e a diminuição do tamanho do enlace é impraticável em instalações reais (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013).

As técnicas de diversidade consistem na transmissão e/ou recepção de cópias de um mesmo sinal, com a modificação de ao menos um parâmetro nos sinais, e são classificadas em diversidade espacial, temporal, de frequência ou comprimento de onda e polarização. Essas técnicas têm sido largamente propostas para melhorar o desempenho dos siste-

mas de comunicação sem fio, como o sistema de telefonia móvel, que está sujeito ao desvanecimento ocasionado por efeitos de múltiplos percursos. Um dos objetivos da diversidade é combinar vários sinais transmitidos, influenciados de forma independente pelo desvanecimento, para aumentar a potência total recebida (SRIVASTAVA, 2010).

De acordo com a literatura, essas mesmas técnicas podem ser aplicadas de forma eficiente, observando as características específicas da tecnologia, em comunicações ópticas no espaço livre (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; MAJUMDAR, 2015). Alguns tipos de diversidade se destacam na redução de efeitos de desvanecimento ocasionado pela turbulência atmosférica e apresentam uma maior eficiência se comparados aos que são comumente mencionados na literatura. Eles consistem em diversidade espacial em conjunto com esquemas de modulação, tais como *On-Off Keying* (OOK) e *Pulse Position Modulation* (PPM) e detectores múltiplos, diversidade temporal e de comprimento de onda.

A utilização dessas técnicas pode reduzir significativamente esses efeitos, pois os sistemas que utilizam apenas uma entrada e saída são afetados pelo desvanecimento ocasionado por turbulência que pode resultar em degradação da taxa de erro de *bit* (BER) (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; MAJUMDAR, 2015).

Este artigo apresenta uma revisão das técnicas de diversidade na presença dos efeitos ocasionados por turbulência e um aparato teórico que possa embasar pesquisas futuras, tendo em vista as vantagens dos enlaces ópticos no espaço livre para as telecomunicações.

Para isto, são selecionados artigos mais recentes que tratam da utilização do enlace óptico no espaço livre sujeito à turbulência atmosférica em conjunto com técnicas de diversidade espacial, temporal e de comprimento de onda e apresentados os resultados obtidos pelos autores com esses esquemas.

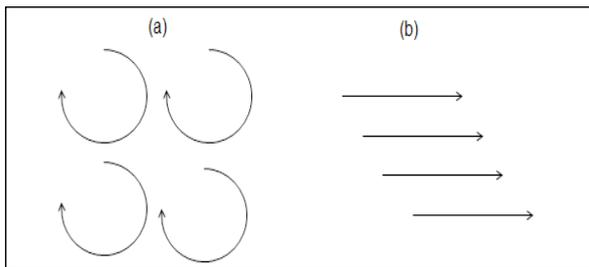
## 2 Turbulência atmosférica

A turbulência atmosférica corresponde à formação de bolsões de ar ou células turbulentas na atmosfera, devido ao calor transferido ao ar por estruturas como paredes, prédios, entre outras. A transferência de energia ocasiona a formação de bolsas de ar quente, que poderão influenciar a propagação dos feixes de luz no espaço livre, tendo em vista que possuem diferentes valores de temperatura, umidade

e pressão, que provocam variações no índice de refração do ar, ocasionando erros nas transmissões em espaço livre (RODRIGUES, 2012).

A teoria da turbulência de Kolmogorov é um dos principais modelos que caracterizam a turbulência atmosférica. Essa teoria considera a atmosfera como um fluido viscoso, que apresenta dois estados de movimento: laminar e turbulento. A distinção entre esses estados está no fato de que, no fluxo laminar, não ocorre mistura, as características de velocidade são uniformes. No fluxo turbulento, a velocidade não mantém suas características uniformes, devido à dinâmica da mistura do fluxo que gera subfluxos aleatórios, conhecidos como turbilhões (ANDREWS; PHILLIPS, 2002).

**Figura 1** – (a) Fluxo de ar turbulento.  
(b) Fluxo de ar laminar.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A transição do fluxo laminar para o fluxo turbulento ocorre quando se obtém um número crítico de Reynolds (ANDREWS; PHILLIPS, 2002), a partir do qual o movimento passa a ser considerado como turbulento –  $R_e > 10^5$ . O número de Reynolds corresponde a uma quantidade adimensional, representada por (ANDREWS; PHILLIPS, 2002)

$$R_e = \frac{Vl}{\nu}, \tag{1}$$

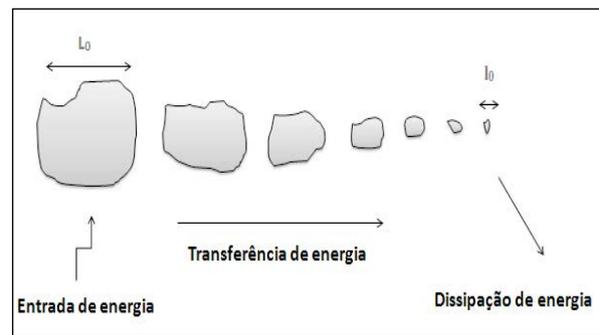
na qual  $V$  é a velocidade do fluxo, em m/s,  $l$  é a dimensão do fluxo, em m, e  $\nu$  é a viscosidade cinemática, em  $m^2/s$ .

Os valores dos parâmetros que caracterizam o fluxo como em estado de turbulência elevada são  $l \sim 2$  m,  $V$  entre 2 e 5 m/s e  $\nu \sim 0,15 \times 10^{-4}$  em  $m^2/s$ .

Uma importante ferramenta para compreensão da estrutura da turbulência é a teoria da cascata de energia da turbulência (ANDREWS; PHILLIPS, 2002).

Segundo ela, a velocidade dos ventos aumenta até atingir um ponto em que exceda o valor do número crítico de Reynolds. Isso gera turbilhões ou células (massas de ar instáveis) com dimensões menores e independentes do fluxo principal e com a influência de forças inerciais, que na atmosfera ocorrem pelo cisalhamento do vento. Turbilhões maiores dividem-se em escalas menores e há a transferência de energia dos turbilhões maiores para os menores (RODRIGUES, 2012; ANDREWS; PHILLIPS, 2002). Esse cascadeamento de energia prosseguirá até que os turbilhões tenham comprimentos equiparáveis às dimensões da escala interna  $l_0$  (CORDEIRO, 2008).

**Figura 2** – Transferência de energia pelas células turbulentas.



Fonte: Adaptada de COURA, 2004.

As células turbulentas possuem um tamanho máximo, conhecido como escala de turbulência externa ( $L_0$ ), e uma dimensão mínima ( $l_0$ ), chamada de escala de turbulência interna. Quando as células atingem um valor inferior a  $l_0$ , elas deixam de transferir energia e passam a dissipá-la em calor. O número de onda espacial do fluxo turbulento é dado por  $k=2\pi/l$ , na qual  $l$  é o comprimento do turbilhão. A transferência de energia iniciará a partir de turbilhões cujo comprimento seja maior que a escala externa  $L_0$  ( $k=2\pi/L_0$ ) (CORDEIRO, 2008).

Caracteristicamente, a escala interna varia entre 1 e 10 milímetros (mm), próximo ao solo, e na ordem de centímetros (cm) ou mais na troposfera e estratosfera. Já a escala externa pode chegar a quilômetros, a partir da camada de superfície até uma altura de 100 m. Assume-se que o tamanho da escala externa cresce linearmente acima dos 100 m, devido à dimensão horizontal tornar-se maior que a vertical, por causa da estratificação (RODRIGUES, 2012; ANDREWS; PHILLIPS, 2002).

Para se obter a dimensão exata dessas escalas, seria necessário conhecer as características internas de cada turbilhão em tempo real, mas isso seria impraticável. Deste modo, alguns modelos assumem  $L_0 \sim \infty$  e  $l_0 \sim 0$  (RODRIGUES, 2012).

A parte intermediária do espectro, localizada entre as escalas externa e interna, é conhecida como subdomínio inercial (CORDEIRO, 2008). Nela não há introdução nem dissipação direta de energia; o fluxo é independente do comprimento  $l$  e a sua importância está na transferência de energia inercial.

A relação entre a temperatura e o índice de refração pode ser representada por (SCHMIDT, 2010)

$$n(r) = 1 + 77,6 \times 10^{-6} (1 + 7,52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T} \quad (2)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda do feixe de luz em micrômetros,  $P$  é a pressão atmosférica em milibares (mbar) e  $T$  é a temperatura do ar em kelvin.

Um parâmetro importante para medir a intensidade de flutuação do índice de refração na atmosfera turbulenta é o coeficiente estrutural do índice de refração, que pode ser representado analiticamente por (SCHMIDT, 2010)

$$C_n^2 = \left[ 77,6 \times 10^{-6} (1 + 7,52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T^2} \right]^2 \frac{(T_1 - T_2)^2}{L^{(2/3)}}, \quad (3)$$

em que  $T_1$  e  $T_2$  são temperaturas do ar medidas por termômetros separados por uma distância  $L$  em metros,  $T$  é a temperatura média entre os dois pontos e  $P$  é a pressão atmosférica em mbar. Flutuações na pressão atmosférica são geralmente desprezadas, por não apresentarem influência significativa no parâmetro (ANDREWS; PHILLIPS, 2002).

Em enlaces horizontais, esse parâmetro é considerado constante ao longo do percurso. Os valores típicos de  $C_n^2$  são  $10^{-17}$  para turbulência fraca,  $10^{-15}$  em turbulência média e  $10^{-12}$  em turbulência forte (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013).

No entanto, este parâmetro varia com a altitude e um dos principais modelos mencionados na literatura é o de Hufnagel-Valley, dado por (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013)

$$C_n^2 = 0,00594 \left( \frac{v}{27} \right) (10^{-5} h)^0 \exp(-h/1000) + 2,7 \times 10^{-6} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (4)$$

em que  $A$  é o valor nominal de  $C_n^2(0)$  ao nível do solo,  $h$  é a altitude em metros e 21 m/s é comumente adotado como  $v$ .

Um elevado valor de  $C_n^2$  não indica necessariamente que a distorção do feixe é elevada (RODRIGUES, 2012); uma correta análise deve considerar outros parâmetros. A intensidade com que a turbulência afeta o feixe de luz pode ser caracterizada pela variância de Rytov, que é dada por (LOU *et al.*, 2012)

$$\sigma_R^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (5)$$

, em que  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $L$  é a distância do enlace em metros.

O principal efeito ocasionado pela turbulência é a cintilação, que provoca variações na potência óptica do feixe, ou seja, alterações na intensidade da luz transmitida em um sistema FSO, devido à colisão com células turbulentas, cujas dimensões são inferiores ao diâmetro do feixe. O sinal sofre flutuações, influenciado pelas mudanças provocadas termicamente no índice de refração do ar. Como resultado, as componentes da onda são detectadas pelo receptor em tempos diferentes.

No domínio espectral, a densidade espectral de potência da flutuação do índice de refração é representada por (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013).

$$\varphi = 0,033 C_n^2 K^{-11/3}, 2\pi/l_0 \ll K \ll 2\pi/l_0 \quad (6)$$

, em que  $K$  é o número de onda espacial.

Por causa da natureza não linear das massas misturadas encontradas em grande quantidade na atmosfera, se torna difícil descrever matematicamente a turbulência. Desse modo, para análise dos modelos de turbulência, são considerados na literatura (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013) os pressupostos de que, no efeito de absorção da onda que está se propagando na atmosfera, a contribuição do calor gerado será insignificante se comparada à gerada no período diurno e de que espalhamentos ocasionados por células turbulentas não ocasionam perdas no feixe de luz (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; TANG, 2012).

Modelos de distribuição para o canal óptico foram desenvolvidos na literatura para estimar os efeitos de turbulência óptica. O modelo exponencial com função negativa, por exemplo, é adequado para condições de turbulência muito forte, o gama-gama, para cenários de turbulência fraca a forte e o log-normal, para regimes de turbulência fraca (BORAH *et al.*, 2012; ANDREWS; PHILLIPS, 2002; LETZEPIS; FÀBREGAS, 2009).

### 3 Técnicas de diversidade para comunicações ópticas no espaço livre

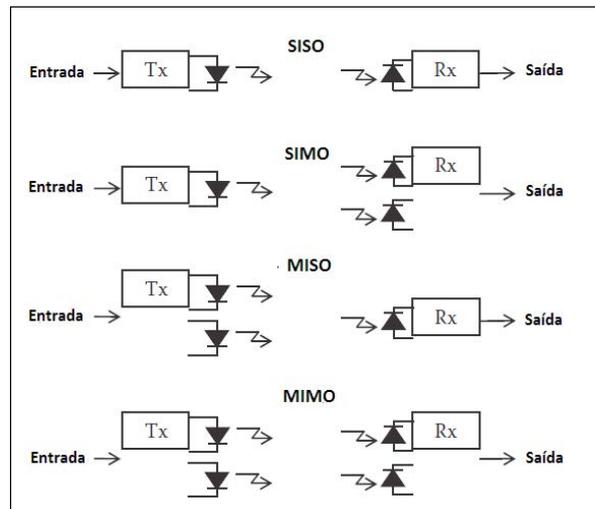
A turbulência atmosférica pode ocasionar, por meio do efeito de cintilação, forte desvanecimento do feixe de luz, com perdas entre 20 e 30 dB. Em um sistema operando em 1 Gbit/s isso pode resultar em erros de 108 bits consecutivos (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013). As técnicas tradicionais mencionadas na literatura são a utilização de fontes luminosas potentes e a redução da distância do enlace (SANTOS, 2008). No entanto, essas técnicas são limitadas, pois a potência máxima permitida a ser utilizada pode não ser suficiente para manter o enlace funcionando em situações de forte turbulência. Além disso a diminuição do tamanho do enlace é impraticável em instalações reais (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; ANDREWS; PHILLIPS, 2002).

Algumas técnicas de diversidade utilizadas nas tradicionais comunicações sem fio, como a espacial, temporal e de comprimento de onda, podem ser adaptadas e aplicadas aos enlaces ópticos no espaço livre, de forma eficiente, para redução dos efeitos ocasionados pela turbulência, observadas suas características (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; MAJUMDAR, 2015).

#### 3.1 Diversidade espacial

A diversidade espacial pode ser realizada por meio de múltiplos feixes transmitidos, múltiplas aberturas no receptor ou a combinação das duas (KHALIGHI; UYSAL, 2014). Essa técnica é classificada em três tipos de arquiteturas, que correspondem a múltiplos feixes transmitidos e múltiplas aberturas na recepção (*Multiple-Input Multiple-Output – MIMO*), múltiplos feixes transmitidos e uma abertura na recepção (*Multiple-Input Single-Output – MISO*) e transmissão de um feixe e múltiplas aberturas na recepção (*Single-Input Multiple-Output – SIMO*).

Figura 3 – Diagrama de bloco dos esquemas de diversidade espacial.



Fonte: GHASSEMLOOY *et al.* (2013).

##### 3.1.1 Diversidade na recepção

O aumento da abertura média do receptor é considerado na literatura como uma das técnicas de diversidade na recepção e um dos métodos mais simples para mitigar os efeitos da turbulência (MAJUMDAR, 2015; KHALIGHI; UYSAL, 2014). Essa técnica é eficiente quando as aberturas das lentes receptoras são maiores que o comprimento da correlação de desvanecimento, definido por (MAJUMDAR, 2015; ANDREWS; PHILLIPS, 2002)

$$\phi = \sqrt{\lambda L} \tag{7}$$

em que  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda do feixe e  $L$ , à distância do enlace.

A redução do desvanecimento utilizando uma abertura média é quantificada por meio do fator de abertura média, dado por (ANDREWS; PHILLIPS, 2002; KHALIGHI; UYSAL, 2014)

$$A = \frac{\sigma_I^2(D)}{\sigma_I^2(D=0)} \tag{8}$$

em que  $\sigma_I^2(D)$  e  $\sigma_I^2(D=0)$  correspondem, respectivamente, ao índice de cintilação para lentes receptoras de tamanho  $D$  e para um receptor pontual com diâmetro  $D$  aproximadamente igual a zero.

O fator de abertura média pode ser obtido também a partir da função de correlação de intensidade normalizada, dada por (MAJUMDAR, 2015)

$$A = \frac{16}{\pi D^2} \int_0^D B_n(\alpha) \left[ \cos^{-1} \left( \frac{\alpha}{D} \right) \frac{\alpha}{D} \left( 1 - \frac{\alpha^2}{D^2} \right)^{1/2} \right] \alpha d\alpha \quad (9)$$

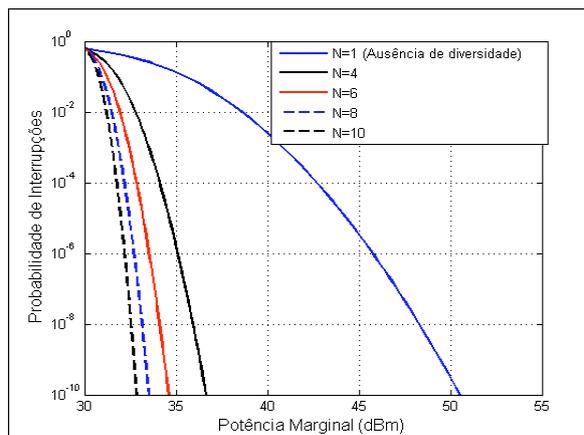
em que  $\alpha$  corresponde à distância entre dois pontos e  $B_n(\alpha)$  é a função de covariância normalizada. Esse fator não depende da forma da abertura, mas da área de abertura do receptor.

O aumento da abertura média do receptor contribui para a redução de efeitos ocasionados pela turbulência, pois reduz o valor do índice de cintilação. Com essa diminuição, a relação sinal-ruído aumenta e, conseqüentemente, melhora o desempenho dos enlaces ópticos no espaço livre na presença da turbulência atmosférica, diminuindo a taxa de erro de *bit* (MAJUMDAR, 2015). Em Khalighi *et al.* (2009) são analisados diferentes tamanhos de lentes nos receptores, comparados a um receptor pontual com diâmetro aproximadamente igual a zero, e observa-se que, quanto maior a lente, melhor a relação sinal-ruído do sistema.

Esse aumento pode não ser uma solução otimizada em algumas configurações, por questões práticas, como em transmissões entre a terra e satélites (ANDREWS; PHILLIPS, 2002). No entanto, é possível alcançar a diversidade espacial de uma grande abertura por meio de múltiplas pequenas aberturas, suficientemente separadas para que o arranjo de detectores produza o mesmo desempenho de um receptor com abertura integrada (ANDREWS; PHILLIPS, 2002). Desse modo, cada abertura do receptor contribuirá com alguns graus de diversidade espacial, após a combinação dos sinais recebidos em diferentes aberturas – essa configuração caracteriza enlaces SIMO. Considerando a descorrelação do desvanecimento nos sinais recebidos, essa solução pode apresentar um desempenho melhor do que o obtido por uma grande abertura com a mesma área total (KHALIGHI; UYSAL, 2014).

A Figura 4 apresenta a probabilidade de interrupções, em função da potência necessária para alcançar determinada probabilidade de falha, em um enlace FSO sujeito a turbulência fraca (modelo Log-normal) na ausência e presença de diversidade na recepção (com  $N = 4, 6, 8$  e  $10$  arranjos de fotodetectores), apresentado em Popoola (2009).

**Figura 4** – Probabilidade de interrupções na ausência e presença de diversidade na recepção em um canal sujeito à turbulência fraca.



Fonte: Adaptada de POPOOLA, 2009.

É possível observar que a potência necessária para alcançar uma menor probabilidade de falha é muito maior na ausência de diversidade do que a apresentada na utilização de arranjos. E quanto maior o número de arranjos de fotodetectores, menor será a potência marginal para alcançar valores menores de probabilidade de interrupção.

Há basicamente três esquemas que podem ser utilizados para combinar os sinais na recepção: eles correspondem a *Maximum Ratio Combining* (MRC), *Equal Gain Combining* (EGC) e *Selection Combining* (SC) (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; MAJUMDAR, 2015; KHALIGHI; UYSAL, 2014).

O combinador linear MRC possui um fator de ganho proporcional à irradiância recebida. Ele requer a confirmação da recepção individual da irradiância e fase de cada sinal, o que o torna inadequado para subportadoras incoerentes, como *Differential Phase-Shift Keying – Subcarrier-Index Modulation* (DPSK – SIM). A saída obtida com o combinador pode ser representada por (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013)

$$SR_{MRC} = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{Ra_i}{N} I_i \sum_{j=1}^N A_j g(t) \cos(\omega_j t + \theta_j) \right] + a_i n \quad (10)$$

, em que  $R$  é a responsividade do fotodetector,  $N$  corresponde ao número de fotodetectores,  $I_i$  é a irradiância recebida de cada transmissor,  $a_i$  é o fator de ganho do combinador e  $n$  é o ruído gaussiano branco aditivo.

Na implementação da combinação EGC, não é necessário estimar a irradiância de cada feixe, mas é importante obter a estimação da fase de todas as subportadoras do sinal para cada abertura. Desconsiderando a componente DC, a fotocorrente na saída do combinador pode ser dada por (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013)

$$SR_{EGC} = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{R}{N} I_i \sum_{j=1}^N A_j g(t) \cos(\omega_{c_j} t + \theta_j) \right] + n, \quad (11)$$

Conforme analisado, os combinadores MRC e EGC requerem a estimação de níveis de irradiância e/ou fase das subportadoras dos sinais; no combinador linear SC isso não é necessário. Nesse esquema é selecionado o feixe com maior relação sinal-ruído, desde que os fotodetectores recebam a mesma radiação de fundo. A radiação na saída é igual ao sinal em apenas uma das ramificações, diferentemente dos outros combinadores, em que a saída corresponde à soma das fotocorrentes individuais. O combinador SC possui a vantagem de apresentar um nível de complexidade inferior, se comparado aos demais combinadores (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013).

Alguns trabalhos analisam o desempenho de sistemas FSO que utilizam a técnica de diversidade na recepção com combinadores lineares e observam uma melhora no canal sujeito a turbulência atmosférica.

Em Krishna *et al.* (2015), são utilizados *Space Time Block Codes* (STBCs) e os sinais recebidos em múltiplas aberturas são combinados pelo esquema MRC. Essa configuração permite uma maximização da relação sinal-ruído e melhora o desempenho do enlace analisado.

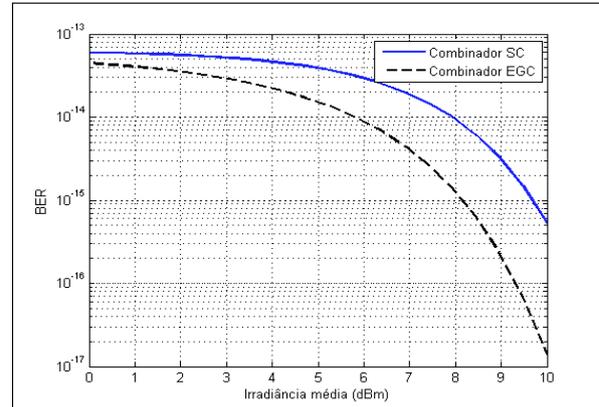
O trabalho apresentado por Niu *et al.* (2010) realiza simulações de um enlace FSO sob os efeitos da turbulência atmosférica, modelado por uma distribuição K. Uma nova formulação da função característica é obtida; baseada nela, a probabilidade de interrupções para um combinador EGC é apresentada.

Comparada às técnicas que utilizam os combinadores MRC e SC, os resultados obtidos pelos autores indicam uma utilidade maior do EGC na recepção de enlaces ópticos no espaço livre.

A Figura 5 apresenta a taxa de erro de *bit* do sistema em função da irradiância média, com os combinadores SC e EGC para dois fotodetectores (N=2) e modulação BPSK em um canal sujeito a turbulência

moderada, a partir dos modelos apresentados em Popoola (2009). Nessa análise o combinador EGC apresenta melhores resultados que o SC.

Figura 5 – BER para um sistema com diversidade utilizando os combinadores SC e EGC.



Fonte: Adaptada de POPOOLA, 2009.

### 3. 1.2 Diversidade na transmissão

Os transceptores FSO que possuem configuração MISO têm múltiplos transmissores ópticos e um fotodetector; as fontes são suficientemente espaçadas, de modo que a radiação recebida seja decorrelacionada.

Uma aproximação alternativa do sinal na recepção é obtida ao considerar que cada fonte do arranjo transmite potência equivalente a um sistema com transmissão simples; nesse caso, a potência necessária aumenta. Baseado nessa formulação, o sinal recebido é dado por (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013)

$$SR = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{R}{M} I_i \sum_{j=1}^N A_j g(t) \cos(\omega_{c_j} t + \theta_j) \right] + n(t) \quad (12)$$

, em que  $R$  é a responsividade do fotodetector,  $M$  e  $N$  correspondem, respectivamente, ao número de fontes e de fotodetectores e  $I_i$  é a irradiância recebida de cada transmissor.

Considerando que a distância entre as fontes ópticas no arranjo é de apenas alguns centímetros, o deslocamento de fase da irradiância recebida, devido aos diferentes percursos, pode ser desprezível, e a relação sinal-ruído de cada portadora condicionada a essa irradiância é dada por (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013)

$$SNR_{MISO} = \left( \frac{RA}{\sqrt{2M}\sigma} \right)^2 \left( \sum_{i=1}^M I \right)^2 \quad (13)$$

, em que  $\sigma$  é a variância do sinal.

Os enlaces com múltiplos feixes transmitidos e uma abertura na recepção constituem um dos esquemas mais simples e são eficientes na redução do desvanecimento no receptor. Em Farid e Hranilovic (2011), os autores analisam a utilização de um código de repetição espacial no transmissor em conjunto com a modulação OOK e são formuladas expressões para obtenção da capacidade de interrupção em diferentes configurações de transmissão de feixes. É observado que o modelo assintótico apresenta melhores resultados, uma otimização da largura do feixe, minimizando a probabilidade de falhas ou interrupções.

### 3.1.3 Diversidade na transmissão e na recepção

Sistemas FSO que utilizam diversidade espacial de transmissão e recepção podem ter um desempenho significativamente melhor, atenuando os efeitos ocasionados por turbulência atmosférica. Múltiplos transmissores e receptores são utilizados para transmissão de sinais em vários caminhos não correlacionados, de modo que o nível de cintilação e a probabilidade de degradação sejam reduzidos. E isso pode ser realizado por meio de múltiplas aberturas nos transceptores ópticos.

Para  $N$  aberturas independentes, quando os sinais recebidos são combinados logicamente, a probabilidade de desvanecimento dos sinais é reduzida para  $(P \leq P_{min})^N$ , em que  $P_{min}$  é a potência mínima de cada abertura do receptor.

Uma das formas de aplicar a diversidade espacial em enlaces ópticos no espaço livre é o uso do arranjo de receptores em detecção direta. Nessa técnica são utilizadas múltiplas aberturas pequenas no receptor, separadas entre si, de modo que os sinais recebidos não estejam correlacionados. Utilizando um arranjo com  $N$  receptores de detecção direta, a soma na saída desses detectores estatisticamente independentes é dada por (MAJUMDAR, 2015)

$$\Gamma = \sum_{j=1}^N (\Gamma_{s,j} + \Gamma_{M,j}) \quad (14)$$

, em que  $\Gamma_s$  é um sinal aleatório e  $\Gamma_M$  é o ruído com média nula em cada arranjo de detectores. Considerando que o ruído e o sinal em cada detector têm a mesma média e variância, a relação sinal-ruído média é dada por (MAJUMDAR, 2015)

$$E[SNR_N] = \sqrt{NE[SNR_1]}, \quad (15)$$

em que  $E[SNR_1] = [\Gamma_{s,1}]/\sigma_{SN,1}$  é a relação sinal-ruído de um detector simples.

Para utilizar as vantagens da diversidade espacial, múltiplos transmissores e receptores podem ser colocados nas duas extremidades (transceptores para transmissão e recepção). As arquiteturas que podem ser utilizadas correspondem às mesmas mencionadas na literatura para as tradicionais comunicações sem fio. Em sistemas FSO, elas dependem de quantas aberturas para transmissão e recepção do feixe de luz serão utilizadas.

A utilização da diversidade espacial nos sistemas FSO em conjunto com esquemas de modulação, tais como OOK e PPM, e detectores múltiplos em modelos de canal para turbulência – por exemplo, Exponencial com Função Negativa, Gama-Gama e Log-Normal – tem sido discutida na literatura como alternativa para a redução do desvanecimento ocasionado em céu limpo com turbulência atmosférica.

Em Abaza *et al.* (2013), os autores analisam os resultados da utilização de sistemas MIMO em conjunto com a combinação de ganho (EGC) e a modulação PPM em um modelo de canal Log-normal, para um enlace óptico no espaço livre de curta distância, e verificam um aumento na taxa de transmissão de dados de 128% e 185%, respectivamente, para as configurações MIMO com dois transmissores e receptores (2 x 2) e quatro transmissores e receptores (4 x 4), comparadas à utilização de simples entrada e saída (SISO).

Na pesquisa apresentada por Shaban *et al.* (2011), é investigado e comparado o desempenho de sistemas MIMO nos regimes de turbulência atmosférica (fraca, moderada e forte) utilizando modulação PPM com os combinadores EGC, SC e MRC na recepção. A probabilidade de erro é analisada por meio de simulações *Monte Carlo*, assumindo diferentes canais atmosféricos. Com base nessas configurações, os autores verificam que o combinador MRC apresenta os melhores resultados, alcançando uma probabilidade de erro inferior à apresentada pelos outros dois.

Em Chatzidiamantis *et al.* (2010), os autores propõem um algoritmo baseado em um sistema MIMO em conjunto com o *Maximum-Likelihood Sequence Detection* (MLSD), que é uma técnica que explora a correlação temporal induzida pela turbulência atmosférica. Essas técnicas são simuladas em um canal turbulento modelado por uma distribuição Log-normal e utilizando a modulação OOK. A partir dos resultados obtidos, é verificada uma elevada complexidade do MLSD nas simulações.

Inúmeras combinações e análises podem ser realizadas utilizando sistemas MIMO, tendo em vista a melhoria na transmissão das comunicações ópticas sem fio, minimizando os efeitos prejudiciais do canal.

### 3.2 Diversidade temporal

A diversidade temporal seria outra alternativa para minimizar problemas ocasionados por turbulência (NISTAZAKIS; TOMBRAS, 2012), assim como nos tradicionais sistemas de comunicação sem fio.

De acordo com a hipótese da turbulência congelada de Taylor (MAJUMDAR, 2015; FREIRE, 2012), os turbilhões turbulentos são tratados como se fossem congelados no espaço e se movem por meio da componente de velocidade média. Essa hipótese permite converter a estatística espacial em temporal; assim, a diversidade de tempo pode ser utilizada para melhorar o desempenho dos enlaces ópticos no espaço livre sob os efeitos da turbulência.

Na análise do desempenho de sistemas FSO no domínio do tempo, é importante observar a função de covariância do canal sujeito à turbulência, pois isso é útil para determinar o tempo de correlação. A função de covariância normalizada de flutuações de intensidade para uma onda plana é dada por (MAJUMDAR, 2015)

$$c(\tau, D) = \frac{C(\tau, D)}{C(\tau, 0)} \quad (16)$$

em que

$$C(\tau, D) = 8\pi^2 k^2 L \int_0^1 \int_0^\infty k \delta_n(\kappa) J_0(\kappa V \tau) \cdot \exp\left(-\frac{D^2 \kappa^2}{16}\right) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{L \kappa^2 \xi}{k}\right)\right) d\kappa d\xi \quad (17)$$

em que  $\tau$  é o intervalo de tempo,  $D$  é o diâmetro de abertura do receptor,  $\delta_n(k)$  é a potência espectral espacial do índice de refração,  $J_0$  é a função de Bessel de primeiro tipo,  $L$  é a distância do enlace,  $k$  é o número de onda,  $\kappa$  é o número de onda espacial e  $\xi$  é a variável de transformação.

Em regimes de turbulência fraca, atrasos maiores que alguns milissegundos podem ser suficientes para melhorar o desempenho do sistema (MAJUMDAR, 2015).

Em um sistema de comunicação baseado na diversidade temporal, o transmissor envia o sinal  $Y$  vezes, separadas por codificação de fonte, em que o fluxo de dados é atrasado ou separado em períodos de tempo fixos. O receptor recebe  $Y$  cópias do sinal, as quais são decodificadas; as cópias recuperadas são combinadas e é determinado se foi enviado *bit* um ou zero. Essa técnica é realizada totalmente no domínio óptico (MAJUMDAR, 2015).

Alguns trabalhos apresentam resultados positivos da utilização dessa técnica. Em Kwok *et al.* (2008), os autores analisam a utilização de um receptor com diversidade temporal em conjunto com a modulação OOK e a codificação *Manchester* e *Non-Return-to-Zero*. Para uma taxa de transmissão de 1,25 Gbits/s em um canal turbulento modelado por uma distribuição Log-normal, é verificado que a probabilidade de erro utilizando a codificação *Manchester* é reduzida para um valor inferior a 0,1% quando a diversidade temporal é empregada.

A transmissão do sinal original determinado número de vezes, por meio de diferentes portadoras e intervalos de tempo, apresenta baixo custo e simplicidade na obtenção de ganho de diversidade, em comparação com os esquemas de correção de erros e óptica adaptativa. Conforme observado em Popoola e Ghassemlooy (2010), em regime de turbulência fraca, uma retransmissão do feixe de luz pode apresentar um ganho de até 4,5 dB e em condições de turbulência forte, para alcançar um ganho de até 3 dB, são necessárias cinco transmissões de cópias do sinal original.

### 3.3 Diversidade em comprimento de onda

Uma outra aplicação da diversidade em sistemas FSO é o método de diversidade por comprimento de onda, em que o sistema utiliza múltiplos transmissores enviando a mensagem no mesmo instante de tempo, mas em comprimentos de onda diferentes, e

cada receptor detecta o sinal apenas no comprimento de onda específico (NISTAZAKIS; TOMBRAS, 2012).

Em Xarcha *et al.* (2012), os autores analisam a utilização da diversidade em comprimento de onda para sistemas FSO que operam sob condições de turbulência atmosférica modeladas pela distribuição Log-Normal; observa-se uma melhora no desempenho e um aumento moderado na complexidade e custo dos sistemas. Na pesquisa realizada por Nistazakis e Tombras (2012), é analisada a combinação de diversidade de comprimento de onda e temporal em um canal turbulento modelado pela distribuição Gama-Gama, e são obtidos resultados numéricos em cenários práticos de enlaces FSO que apresentam aumento de disponibilidade e desempenho desses sistemas.

A utilização de modelos de diversidade combinados pode reduzir significativamente a probabilidade de erro em sistemas FSO sujeitos à turbulência atmosférica (GHASSEMLOOY *et al.*, 2013; MAJUMDAR, 2015; NISTAZAKIS; TOMBRAS, 2012).

#### 4 Considerações finais

Técnicas de diversidade se apresentam na literatura como uma das ferramentas mais promissoras para o combate aos efeitos da turbulência sobre sistemas de comunicações ópticas no espaço livre.

Neste trabalho, foram apresentadas as principais técnicas descritas – diversidade espacial no transmissor e no receptor, diversidade temporal e diversidade em comprimento de onda – e mostradas suas principais características, vantagens e desvantagens no sistema.

A revisão apresentada pode servir de base para estudos sobre o desempenho da diversidade em sistemas FSO como técnica de melhoria na qualidade de transmissão.

#### REFERÊNCIAS

ABAZA, M.; MESLEH, R.; MANSOUR, A.; ALFALOU, A. MIMO techniques for high data rate free space optical communication system in log-normal channel. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGICAL ADVANCES IN ELECTRICAL, ELECTRONICS AND COMPUTER ENGINEERING, 2013, Konya, Turkey. **Proceedings...** Konya, Turkey: IEEE, 2013. p. 1-5.

ANDREWS, L. C.; PHILLIPS, R. L. **Laser Beam Propagation through Random Media**. 2. ed. Bellingham, WA, USA: SPIE press, 2002.

BORAH, D. K.; BOUCOUVALAS, A. C.; DAVIS, C. C.; HRANILOVIC, S.; YANNOPOULOS, K. A Review of Communication-Oriented Optical Wireless Systems. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2012, n. 1, p. 1-28, 2012.

CHATZIDIAMANTIS, N. D.; UYSAL, M.; TSIFTSIS, T. A.; KARAGIANNIDIS, G. K. Iterative near maximum-likelihood sequence detection for MIMO optical wireless systems. **Lightwave Technology**, v. 28, n. 7, p. 1064-1070, 2010.

CORDEIRO, M. C. R. **Avaliação Experimental dos Efeitos de Cintilação no Canal Óptico no Espaço Livre em 780 nm, 1550 nm e 9100 nm**. 2008. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

COURA, D. J. C. **Análise dos principais efeitos da propagação de sinais ópticos, no espaço livre, revestida de uma plataforma numérica eficiente**. 2004. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, SP, 2004.

SANTOS, L. B. **Análise de sistemas de comunicação utilizando óptica no espaço livre**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

FARID, A. A.; HRANILOVIC, S. Outage capacity for MISO intensity-modulated free-space optical links with misalignment. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 3, n. 10, p. 780-789, 2011.

FREIRE, L. S. **Teorias de camada limite atmosférica: modelo de crescimento, fluxo de estranhamento e análise espectral**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GHASSEMLOOY, Z.; POPOOLA, W.; RAJBHANDARI, S. **Optical Wireless Communications**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.

IJAZ, M.; GHASSEMLOOY, Z.; RAJBHANDARI, S.; MINH, H. L.; PEREZ, J.; GHOLAMI, A. Comparison of 830 nm and 1550 nm based free space optical communications link under controlled fog

conditions. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATION SYSTEMS, NETWORKS AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING, 8., 2012, Poznan, Poland. **Proceedings...** Poznan: IEEE, 2012. p. 1-5.

KAZEMLOU, S.; HRANILOVIC, S.; KUMAR, S. All-optical multihop free-space optical communication systems. **Lightwave Technology**, v. 29, n. 18, p. 2663-2669, 2011.

KHALIGHI, M. A.; SCHWARTZ, N.; AITAMER, N.; BOURENNANE, S. Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems. **Journal of Optical Communications and Networking**, v. 1, n. 6, p. 580-593, 2009.

KHALIGHI, M. A.; UYSAL, M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, v. 16, n. 4, p. 2231-2258, 2014.

KIM, I. I.; MCARTHUR, B.; KOREVAAR, E. Comparison of LASER beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. In: **Proceedings SPIE – Optical Wireless Communications III**, v. 4214, 2001.

KIM, I. I.; STIEGER, R.; KOONTZ, J. A.; MOURSUND, C.; BARCLAY, M.; ADHIKARI, P.; SCHUSTER, J.; KOREVAAR, E.; RUIGROK, R.; DECUSATIS, C. Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication system. **Optical Engineering**, v. 37, n. 12, p. 3143-3155, 1998.

KRISHNA, M.; KUMAR, D.; SAHU, G. Comparison of alamouti and MRC schemes over various channels for Free Space Optics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, SIGNALS, COMMUNICATION AND OPTIMIZATION (EESCO), 2015, Visakhapatnam, India. **Proceedings...** Visakhapatnam: IEEE, 2015. p. 1- 4.

KWOK, C. H.; PENTY, R. V.; WHITE, I. H. Link reliability improvement for optical wireless communication systems with temporal-domain diversity reception. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 20, n. 9, p. 700-702, 2008.

LETZEPIS, N.; FÀBREGAS, A. G. Outage probability of the Gaussian MIMO free-space optical channel with PPM. **IEEE Transactions on Communications**, v. 57, n. 12, p. 3682-3690, 2009.

LOU, Y.; WEN, G.; CHEN, C.; ZHAO, Y.; JIANG, H.; TONG, S. Experimental measurement of atmospheric coherence length of laser propagation in the atmospheric turbulence. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTOELECTRONICS AND MICROELECTRONICS, 2012, Changchun, China. **Proceedings...** Changchun: IEEE, 2012.

MAJUMDAR, A. K. **Advanced free space optics (FSO)**. 1. ed. New York: Springer Science, 2015.

NISTAZAKIS, H. E.; TOMBRAS, G. S. On the use of wavelength and time diversity in optical wireless communication systems over gamma-gamma turbulence channels. **Optics & Laser Technology**, v. 44, n. 7, p. 2088-2094, 2012.

NIU, M.; CHENG, J.; HOLZMAN, J. Diversity reception for coherent free-space optical communications over K-distributed atmospheric turbulence channels. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (WCNC), 2010, Sydney, Australia. **Proceedings...** Sydney: IEEE, 2010. p. 1-6.

POPOOLA, W. O. (2009), **Subcarrier intensity modulated free-space optical communication system**. 290 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Northumbria, Newcastle, UK, 2009.

POPOOLA, W.; GHASSEMLOOY, Z. Terrestrial free-space optical links with temporal diversity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATION SYSTEMS NETWORKS AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING (CSNDSP), 7., 2010, Newcastle upon Tyne, UK. **Proceedings...** Newcastle upon Tyne: IEEE, 2010. p. 598-603.

RODRIGUES, G. K. **Estudo da influência atmosférica em um sistema digital com multiplexação em código**. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

SCHMIDT, J. D. **Numerical simulation of optical wave propagation**. Washington, USA: SPIE Press, 2010.

SHABAN, H. A.; AZIZ, S. D. A. E.; ABOULSEOD, A. K.; ALY, M. H. Error performance of free space optical MIMO systems in weak, moderate and severe atmospheric turbulence channels. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 24., 2011, Niagara Falls, Canada. **Proceedings...** Niagara Falls: IEEE, 2011. p. 777-782.

SRIVASTAVA, N. Diversity schemes for wireless communication: a short review. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, v. 15, n. 2, p. 134-142, 2010.

TANG, X. **Polarisation shift keying modulated free-space optical communication systems**. 2012. 239 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Northumbria, Newcastle, UK, 2012.

XARCHA, V.; STASSINAKIS, A.; NISTAZAKIS, H.; LATSAS, G.; HANIAS, M.; TOMBRAS, G.; TSIGOPOULOS, A. Wavelength diversity/or Free Space Optical Systems: performance evaluation over log normal turbulence channels. In: International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 19., 2012, Warsaw, Poland. **Proceedings...** Warsaw: IEEE, 2012. v. 2, p. 678-683.