

# Modelo Analítico da Potência Óptica no Enlace de Comunicação Óptica no Espaço Livre Empregando Modulação Externa

Alessandro Roberto dos Santos, André Paim Gonçalves, Robson Ribeiro Carreira, José Edimar Barbosa Oliveira  
Centro de Guerra Eletrônica da Marinha, Centro de Instrução Almirante Wanderkolke Instituto Tecnológico de Aeronáutica

**Resumo** - Com o desafio de encontrar novos meios de comunicações que ofereçam maior segurança, velocidade e capacidade de canal e baixo custo, muitas linhas de pesquisas estão correlacionadas aos enlaces que empregam a Comunicação Óptica no Espaço Livre. Neste trabalho é apresentada a modelagem analítica da potência óptica do enlace de FSO que emprega modulação externa sob efeito da atenuação e turbulência atmosférica, principalmente quanto ao fenômeno ligado à dispersão atmosférica e o efeito destes fenômenos sob o enlace.

**Palavras-Chave** - Comunicação Óptica no Espaço livre, Modulação Externa, Dispersão Atmosférica, Teorema de Graf.

## I. INTRODUÇÃO

A Comunicação Óptica no Espaço Livre (*Free Space Optical Communication – FSO*) oferece benefícios tais como a redução da probabilidade de bloqueio e interferência, facilidade de instalação, mobilidade, inexistência de uma regulamentação oficial para emprego, grande largura de banda, velocidade de transmissão, além de permitir o acesso à última milha (*last mile*). Porém, limitações neste tipo de enlace, como os efeitos atmosféricos causados pela atenuação, composta pelo fenômeno de absorção e espalhamento, a turbulência atmosférica, representada principalmente pelo efeito da cintilação, além do fenômeno da dispersão atmosférica, pouco comentado na literatura, contribuem para degradar o sinal óptico, reduzindo sua intensidade e alcance de propagação [1].

Para analisar o efeito da atmosfera na propagação do sinal óptico, este artigo apresenta um estudo do enlace analógico de Comunicação Óptica no Espaço Livre empregando modulação externa por meio do modulador eletro-óptico Mach-Zehnder de dupla entrada, detecção direta e sem amplificação. Na seção II é apresentado o modelo analítico do sinal óptico na saída do transmissor e na seção III o modelo analítico da potência do sinal óptico (balanço de potência) o efeito destes fenômenos da atenuação, turbulência e dispersão atmosférica nas modulações de banda lateral simples (*Single Side Band – SSB*) e banda lateral dupla (*Double Side Band – DSB*). Na seção IV é realizada a análise do efeito

Alessandro Roberto dos Santos, alessandrorsantos@yahoo.com.br, Tel +55-21-2189-1563; André Paim Gonçalves, andrepg43@yahoo.com.br, Tel +55-21-2189-1563; Robson Ribeiro Carreira, windcarreira@hotmail.com Tel. +55-21-97624-2584; José Edimar Barbosa Oliveira, edimar@ita.br, Tel +55-12-3947-6820

da dispersão atmosférica, por meio da metodologia apresentada por [2]. A seção V apresenta a análise do sinal atmosférico no enlace de FSO, enquanto na seção VI é feita a análise de desempenho do enlace de FSO recorrendo às expressões obtidas nas seções anteriores.

## II. MODULAÇÃO EXTERNA DO SINAL ÓPTICO

Considerando um enlace FSO com modulação de intensidade, detecção direta e sem amplificação, o transmissor é constituído por uma fonte óptica, modulador Mach-Zehnder de dupla entrada de RF (MZM-DD), fonte de RF, junção híbrida e deslocador de fase, como apresenta o diagrama esquemático representado na Fig. 1 [1]:

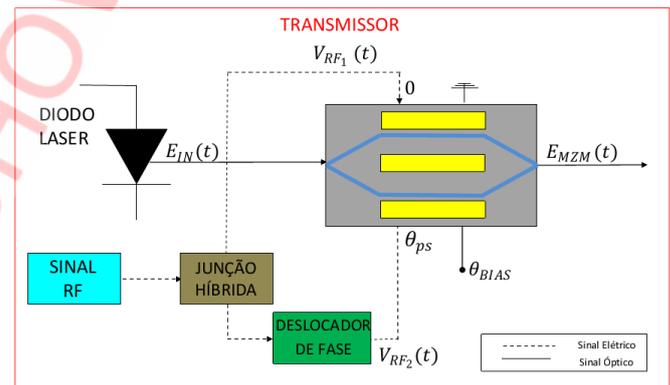


Fig. 1. Representação esquemática do transmissor.

Baseado na figura, o campo elétrico aplicado no modulador é representado pela expressão:

$$E_{IN}(t) = \sqrt{\frac{2P_{IN}Z_w}{A_e}} e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (1)$$

onde,  $A_e$  é a área efetiva da seção transversal do feixe,  $P_{IN}$  a potência do laser,  $Z_w$  a impedância de onda da estrutura eletromagnética que conecta a saída do laser com o MZM,  $\omega_0$  é a frequência (rad/s) e  $\phi_0$  a fase óptica [1],[3].

Nos acessos de RF são inseridos, em cada braço do MZM-DD, dois sinais elétricos defasados em fase, cujas expressões são representadas por:

$$V_{RF_1}(t) = V_{RF}^{(1)} \cos(\omega_{RF} t) \quad (2.1)$$

$$V_{RF_2}(t) = V_{RF}^{(2)} \cos(\omega_{RF} t + \theta_{PS}) \quad (2.2)$$

onde,  $V_{RF_1}(t)$  e  $V_{RF_2}(t)$  são as tensões de RF disponíveis na saída da junção híbrida, com amplitudes  $V_{RF}^{(1)}$  e  $V_{RF}^{(2)}$ , respectivamente,  $\omega_{RF}$  é a frequência de RF e  $\theta_{PS}$  o deslocamento de fase do sinal de RF [1],[3].

Desta forma, a potência do sinal óptico na entrada do modulador é dividida igualmente entre os seus dois braços através da junção “Y” e a tensão elétrica aplicada nos seus eletrodos irá gerar um campo elétrico perpendicular à direção de propagação do sinal óptico. Devido ao efeito eletro-óptico do material, niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ) neste caso, o índice de refração do meio será alterado, provocando mudança na fase do sinal óptico propagante[4],[5]. Na saída do modulador, a recombinação dos campos elétricos em cada braço irá resultar na seguinte expressão para a envoltória do campo elétrico:

$$E_{MZM}(t) = \frac{L_{mzm}}{2} \{E_0 [e^{-j\Delta\phi_1} + e^{-j\Delta\phi_2}]\}, \quad (3.a)$$

onde,

$$\Delta\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_e l - \pi \frac{V_{RF}^{(1)}}{V_\pi} \cos(\omega_{RF} t) \quad (3.b)$$

$$\Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_e l - \pi \frac{V_{RF}^{(2)}}{V_\pi} [\cos(\omega_{RF} t + \theta_{PS})] + \theta_{BIAS}, \quad (3.c)$$

é a variação de fase induzida pelo campo elétrico em cada braço do modulador,  $L_{mzm} = 10^{\frac{-L_{mzm}(dB)}{20}}$  é a perda por inserção do MZM,  $\theta_{BIAS}$  é o ângulo correlacionado a tensão de polarização e  $V_\pi$  a tensão de meia onda. Reescrevendo a equação (3.a) na forma da série de Fourier complexa, tem-se:

$$E_{MZM}(t) = \frac{L_{mzm} E_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{jn \omega_{RF} t} \quad (4)$$

$$a_n = j^n [J_n(m_1) + J_n(m_2)] e^{j(n\theta_{PS} + \theta_{BIAS})}$$

onde  $J_n(\cdot)$ , representa a função de Bessel de primeira espécie de ordem  $n$  com os argumentos representados pelos índices de modulação  $m_1 = \pi \frac{V_{RF}^{(1)}}{V_\pi}$  e  $m_2 = \pi \frac{V_{RF}^{(2)}}{V_\pi}$  [1],[3].

A partir da equação (4), que representa o sinal óptico modulado que é transmitido para atmosfera, observa-se que este é composto por uma série de componentes espectrais dependentes das características do MZM-DD, da fonte óptica e do sinal de modulação.

### III. MODELAGEM DO SINAL ÓPTICO NO CANAL ATMOSFÉRICO

O canal atmosférico é um meio aleatório formado por moléculas e partículas em suspensão que varia de acordo com o tempo, altitude e localização geográfica. No enlace de FSO, há uma total dependência do canal atmosférico para propagar o sinal óptico, sendo que os fenômenos da atenuação e turbulência atmosférica são analiticamente representados por:

$$\theta(\omega_n) = [\alpha(\omega_n) + j\beta(\omega_n)]L, \quad (5)$$

onde  $\alpha(\omega_n)$  representa a atenuação atmosférica (absorção e espalhamento) e  $\beta(\omega_n)$  o fator de fase da componente espectral de ordem  $n$ , que representa a dispersão atmosférica, um fenômeno componente da turbulência atmosférica [1],[3]. Logo, o campo elétrico do sinal óptico modulado sob influência dos fenômenos atmosféricos em questão é igual a:

$$E_{FSO}(t) = \frac{L_{mzm} E_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{j[\omega_n t + \phi]} e^{-\alpha(\omega_n)L} e^{-j\beta(\omega_n)L} \quad (6)$$

onde  $\omega_n = \omega_0 + n\omega_{RF}$  é a frequência óptica e  $\phi$  o desvio de fase. Para avaliar o efeito da dispersão atmosférica, é determinada a distorção em atraso de grupo,  $\tau_g$ , que é o tempo necessário para que o sinal óptico percorra uma distância  $L$ . Logo, tem-se:

$$\tau_g = \frac{\partial\theta(\omega)}{\partial\omega} = \frac{\partial\beta(\omega)}{\partial\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} L + \frac{\partial^2\beta(\omega)}{\partial\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)L + \dots \quad (7)$$

sendo que, neste estudo, considera-se apenas o termo de segunda ordem em virtude das pequenas variações de frequência em torno da componente espectral  $\omega_0$  e um comportamento não muito brusco da função  $\beta(\omega_n)$ . E recorrendo a equação anterior, determina-se a dispersão de atraso de grupo,  $\tau_\lambda(\lambda)$ :

$$\tau_\lambda(\lambda) = \frac{\partial\tau_g}{\partial\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial^2\beta(\omega)}{\partial\omega^2} L \Big|_{\omega=\omega_0}, \quad (8)$$

e conseqüentemente o parâmetro de dispersão  $D(\lambda)$ , que é a razão entre  $\tau_\lambda(\lambda)$  e  $L$ :

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \tau_\lambda(\lambda) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta'' \quad (\text{ps/nm.km}) \quad (9)$$

onde  $\beta'' = \frac{\partial^2\beta(\omega)}{\partial\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0}$  [6].

Para este estudo, a análise da dispersão atmosférica é realizada por meio do caso particular da propagação eletromagnética guiada na fibra óptica, por meio da constante de estrutura do índice de refração do ar, pois a dispersão cromática está ligada à variação do índice de refração do material em função do comprimento de onda. Para o enlace de FSO este conceito também é válido, pois a atmosfera é composta por células de ar de diferentes tamanhos e temperaturas que gera a dependência do índice de refração com relação ao comprimento de onda. Considerando o efeito da dispersão cromática (ou dispersão atmosférica no caso do enlace FSO) como uma dispersão de material, pode-se expressar o coeficiente de dispersão atmosférica em função do parâmetro de dispersão material [2],[6]-[7]:

$$D_{FSO}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2} \quad (10)$$

onde  $n(\lambda)$  é o índice de refração em função do comprimento de onda. Considerando que a constante de estrutura do índice de refração,  $C_n^2$ , determina a variação do índice de refração gerada pela turbulência atmosférica, pode-se reescrever a equação (10) na forma [2],[8]:

$$D_{FSO}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 C_n^2}{\partial \lambda^2}, \quad (11)$$

onde,

$$C_n^2 = \left[ 77,6(1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^{-2}) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{P}{T^2} \right]^2 \frac{(T_2 - T_1)^2}{\sqrt{L^{2/3}}}. \quad (12)$$

onde  $|T_1 - T_2|$  é o módulo da diferença de temperatura entre dois pontos em kelvin,  $T$  a temperatura média em kelvin,  $P$  a pressão atmosférica em mBar e  $L$  é a distância do enlace em km. Uma segunda forma de análise da dispersão atmosférica é considerando a temperatura e pressão como padrão:

$$D_{FSO}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2}, \quad (13)$$

onde  $\frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2}$  é a segunda derivada do índice de refração em relação ao comprimento de onda [2].

Logo, a equação (6) é reescrita em função do termo de segunda ordem da componente espectral e do efeito da atenuação geométrica sendo igual a:

$$E_{FSO}(t) = 10^{-\frac{\alpha_{dB} L}{20}} \frac{L_{mzm} E_0}{2} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right)^2 \times \sqrt{\tau_{TR} \tau_{REC}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{j[\omega_n t + \phi]} e^{-\frac{1}{2} j \beta'' (n \omega_{RF})^2 L}, \quad (14)$$

onde  $D$  é o diâmetro da lente do receptor,  $d$  o diâmetro da lente do transmissor,  $\theta_t$  o ângulo de divergência do feixe,  $L$  o comprimento do enlace,  $\tau_{TR}$  e  $\tau_{REC}$  representam a eficiência óptica do transmissor e do receptor, respectivamente, e sua potência é igual a:

$$P_{FSO} = \frac{1}{2Z_W} [E_{FSO}(t)]^* [E_{FSO}(t)] A_e \quad (15)$$

#### IV. POTÊNCIA ÓPTICA NO ENLACE DE FSO

Uma das formas de analisar o enlace de FSO é por meio da potência óptica que chega ao receptor, denominado, na literatura, de balanço de potência. Neste estudo, a análise deste desempenho é realizada por meio da equação (15). Logo, para determinar uma expressão geral recorrendo à equação citada, efetua-se o produto do campo óptico

modulado pelo seu complexo conjugado, cujo resultado é igual a [1]:

$$|E_{FSO}(t) E_{FSO}(t)^*| = \left| \frac{1}{4} 10^{-\frac{\alpha_{dB} L}{10}} \left[ L_{mzm} E_0 \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right)^2 \right]^2 \tau_{TR} \tau_{REC} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_n a_l e^{j(n-l)\omega_{RF} t} e^{-j \left[ \frac{1}{2} \beta'' (\omega_0)(n-l)^2 \right] L} \right| \quad (16)$$

onde,

$$a_n = j^n [J_n(m_1) + J_n(m_2) e^{j(n\theta_{PS} + \theta_{BIAS})}], \quad (17.a)$$

$$a_l = j^{-l} [J_l(m_1) + J_l(m_2) e^{-j(l\theta_{PS} + \theta_{BIAS})}] \quad (17.b)$$

e a potência óptica é igual a:

$$P_{FSO} = \frac{A_e}{2Z_W} \left| \frac{1}{4} 10^{-\frac{\alpha_{dB} L}{10}} \left[ L_{mzm} E_0 \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right)^2 \right]^2 \tau_{TR} \tau_{REC} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_n a_l e^{j(n-l)\omega_{RF} t} e^{-j \left[ \frac{1}{2} \beta'' (\omega_0)(n-l)^2 \right] L} \right| \quad (18)$$

Por conveniência, calcula-se a componente espectral da potência óptica em uma dada frequência igual ao múltiplo  $k$  da frequência de RF de entrada. Esta condição é satisfeita impondo  $k = n - l$ . Logo, a equação (18) é reescrita na forma [1]:

$$P_{FSO}(k\omega_{RF}) = \frac{A_e}{2Z_W} \left| 10^{-\frac{\alpha_{dB} L}{10}} \left[ L_{mzm} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right)^2 \right]^2 \tau_{TR} \tau_{REC} \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} j^k [J_{k+l}(m_1) J_l(m_1) + J_{k+l}(m_2) J_l(m_2) e^{-j(l\theta_{PS} + \theta_{BIAS})} + J_{k+l}(m_2) J_l(m_1) e^{j(k+l)\theta_{PS} + \theta_{BIAS}} + J_{k+l}(m_2) J_l(m_2) e^{jk\theta_{PS}}] e^{j \left[ \frac{1}{2} k^2 + l \right] \xi} \right|, \quad (19)$$

onde  $\xi = k^2 \beta'' (\omega_0) \omega_{RF}^2 L$ .

Observa-se que não foi empregado nenhum método de aproximação para determinar a equação acima, a qual consiste de uma série infinita cujos termos dependem do produto de funções de Bessel de primeira espécie. A fim de simplificar a equação, recorre-se ao teorema Graf [9]-[10], cujo resultado final da expressão é igual a [1]:

$$P_{FSO}(k\omega_{RF}) = \frac{A_e}{2Z_W} \left| 10^{-\frac{\alpha_{dB}L}{10}} \left[ L_{mzm} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right) \right]^2 \right|^2 \tau_{TR} \tau_{REC} \times \left\{ J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} \right) \right] (e^{jk\pi} + e^{jk(\pi + \theta_{PS})}) + J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} - \frac{\theta_{PS}}{2} \right) \right] e^{j \left[ k(\pi + \frac{\theta_{PS}}{2}) - \theta_{BIAS} \right]} + J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} + \frac{\theta_{PS}}{2} \right) \right] e^{j \left[ k(\pi + \frac{\theta_{PS}}{2}) + \theta_{BIAS} \right]} \right\} \quad (20)$$

onde  $\xi = k^2 \beta'' \omega_{RF}^2 L$  e  $m = \pi \frac{V_{RF}^{(1)}}{V_\pi} = \pi \frac{V_{RF}^{(2)}}{V_\pi}$ .

Assim, a equação (20) representa o modelo analítico da potência óptica no enlace de FSO, que possibilita analisar o desempenho do sinal óptico transmitido sob o efeito da atmosfera em cada harmônico, em um determinado deslocamento de fase do sinal de RF,  $\theta_{PS}$ , e tensão de polarização  $\theta_{BIAS}$ .

Nesta análise, consideram-se as seguintes modulações ópticas utilizadas no enlace de FSO em questão: a Banda Lateral Simples (*Single Side Band – SSB*) e Banda Lateral Dupla (*Double Side Band – DSB*). Logo, as expressões da potência óptica nas modulações DSB ( $\theta_{PS} = \pi$  e  $\theta_{BIAS} = \frac{\pi}{2}$ ) e SSB ( $\theta_{PS} = \frac{\pi}{2}$  e  $\theta_{BIAS} = \frac{\pi}{2}$ ) são respectivamente iguais a [1]:

$$P_{FSO\_DSB}(k\omega_{RF}) = \frac{P_{IN}}{4} \left| 10^{-\frac{\alpha_{dB}L}{10}} \left[ L_{mzm} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right) \right]^2 \right|^2 \tau_{TR} \tau_{REC} \times \left\{ J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} \right) \right] (e^{jk\pi} + e^{2jk\pi}) + J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \right] e^{j \left[ k \left( \frac{3\pi}{2} \right) - \frac{\pi}{2} \right]} + J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right] e^{j \left[ k \left( \frac{3\pi}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \right]} \right\} \quad (21.a)$$

$$P_{FSO\_SSB}(k\omega_{RF}) = \frac{P_{IN}}{4} \left| 10^{-\frac{\alpha_{dB}L}{10}} \left[ L_{mzm} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right) \right]^2 \right|^2 \tau_{TR} \tau_{REC} \times \left\{ J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} \right) \right] (e^{jk\pi} + e^{jk \frac{3\pi}{2}}) + J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] e^{j \left[ k \frac{5\pi}{4} - \frac{\pi}{2} \right]} + J_k \left[ 2m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] e^{j \left[ k \frac{5\pi}{4} + \frac{\pi}{2} \right]} \right\} \quad (21.b)$$

E para efetuar uma comparação dos resultados obtidos pelas equações (21.a) e (21.b), determinam-se as expressões da potência óptica pelo método de aproximação de pequenos sinais, cujas expressões são iguais a [1]:

$$P_{FSO\_DSB}(\omega_{RF}) = \frac{P_{IN}}{4} 10^{-\frac{\alpha_{dB}L}{10}} \left[ L_{mzm} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right) \right]^2 2m \cos \left( \frac{\xi}{2} \right), \quad (22.a)$$

$$P_{FSO\_SSB}(\omega_{RF}) = \frac{P_{IN}}{4} 10^{-\frac{\alpha_{dB}L}{10}} \left[ L_{mzm} \left( \frac{D}{d + \theta_t L} \right) \right]^2 \times m\sqrt{2} \cos \left( \frac{\xi}{2} \right) e^{j \frac{3\pi}{4}} - (j + 1) m \operatorname{sen} \left( \frac{\xi}{2} \right) \quad (22.b)$$

## V. ANÁLISE DO CANAL ATMOSFÉRICO NO ENLACE DE FSO

Antes de realizar a análise de desempenho do enlace de FSO, tem-se que determinar os valores dos parâmetros atmosféricos reinantes do local. Para esta situação, postula-se o emprego do enlace de FSO na região de Manaus/AM, entre dois pontos “A” e “B”, cujos valores de temperatura e pressão atmosférica corrigida, seguindo a metodologia adotada por [2]. As Tabelas I.a e I.b apresentam os valores da temperatura e pressão atmosférica consideradas [1]:

TABELA I.A TEMPERATURA CORRIGIDA DE MANAUS/AM

LOCAL	TEMP (T <sub>M</sub> )	ALTITUDE	ALTITUDE CORRIGIDA (D <sub>AL</sub> )	TEMPERATURA CORRIGIDA (T <sub>R</sub> )
Ponto A	22°C	65 m	63,5 m	21,6 °C
Ponto B	22°C	50 m	48,5 m	21,7° C

TABELA I.B PRESSÃO ATMOSFÉRICA CORRIGIDA DE MANAUS/AM

LOCAL	PRESSÃO (p <sub>M</sub> )	ALTITUDE	ALTITUDE CORRIGIDA (D <sub>AL</sub> )	PRESSÃO CORRIGIDA (p <sub>R</sub> )
Ponto A	1010 mBar	65 m	63,5 m	1009,04 mBar
Ponto B	1012 mBar	50 m	48,5 m	1011,03 mBar

Os valores de temperatura e pressão corrigidas são fundamentais para determinar o parâmetro de dispersão atmosférica. Os parâmetros da atenuação atmosférica, atenuação atmosférica causada pela chuva, atenuação geométrica e cintilação também foram determinados, cujos resultados encontram-se nos gráficos a seguir [1]:

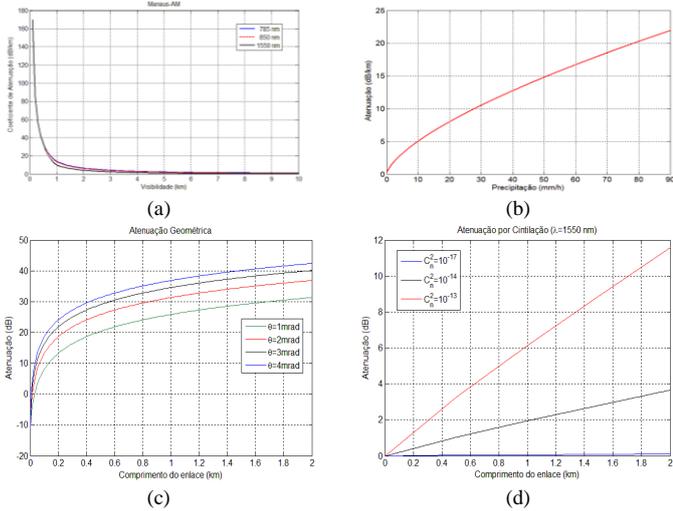


Fig. 3. Gráficos representativos: (a) atenuação atmosférica, (b) atenuação causada pela chuva, (c) atenuação geométrica e (d) cintilação.

Observa-se que os gráficos determinados acima correspondem ao comprimento de enlace igual a 1,76 km.

### VI. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ENLACE DE FSO

A verificação do desempenho do enlace de FSO é realizada por meio das expressões (22.a) e (22.b) que representam a potência óptica nas modulações DSB e SSB, recorrendo aos parâmetros atmosféricos apresentados nos gráficos da seção V e na Tabela II:

TABELA II VALORES EMPREGADOS NO ENLACE DE FSO	
PARÂMETRO	VALOR
Comprimento de onda da portadora óptica	1550 nm
Impedância da fonte de RF	50 $\Omega$
Impedância da carga de RF	50 $\Omega$
Tensão de RF aplicada ao MZM	Máxima de 2,6V
Potência do Laser	20 dBm
Tensão de meia onda	2,0 V
Perdas intrínsecas do modulador	6 dB
Responsividade do fotodetector	9,4 A/W
Sensibilidade do fotodetector	-46 dBm
Área ativa do fotodetector	200 $\mu\text{m}^2$
Diâmetro de abertura da lente do transmissor	100 mm
Diâmetro de abertura da lente do receptor	200 mm
Divergência do feixe	2 mrad
Margem do sistema	6 dB
Visibilidade	600m
Precipitação	31,6 mm/h

Além dos parâmetros citados, recorre-se também a (11) e (13) a fim de determinar os parâmetros de dispersão atmosférica corrigida e padrão respectivamente iguais a 0,007  $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$  e 14  $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$  [1].

Alguns dos resultados das simulações são apresentados nas figuras a seguir, onde se considera o índice de modulação igual a 0,1 e 1,2. A primeira análise, considerando  $D_{FSO}(\lambda) = 0,007 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$  e  $m=0,1$  nas modulações DSB e SSB, revela que houve um aumento da potência óptica na saída do transmissor na modulação SSB, coincidindo as curvas

características e mantendo os mesmos alcances quando empregada a equação obtida pelo teorema de Graf e pelo método de pequenos sinais [1]:

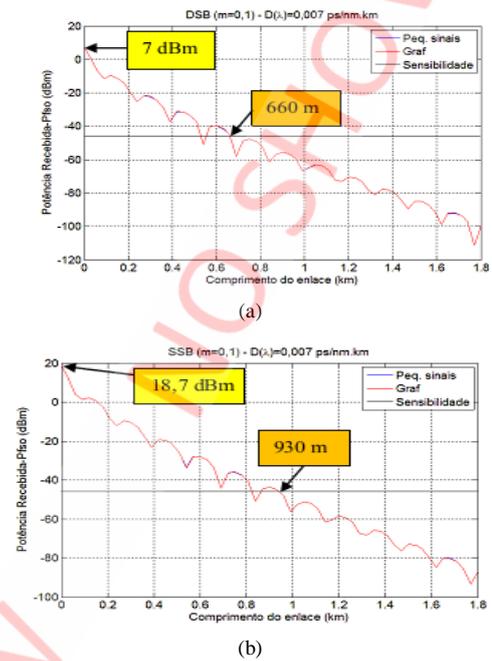


Fig. 4. Gráfico da potência óptica na entrada do receptor em relação ao comprimento do enlace nas modulações DSB (a) e SSB (b) para  $m=0,1$  e  $D(\lambda)=0,007 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ .

Considerando os mesmos parâmetros e mudando apenas o coeficiente de dispersão para  $D_{FSO}(\lambda) = 14 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ , observa-se que os comportamentos das curvas características obtidas pelo teorema de Graf e método de pequenos sinais foram mantidos. Porém houve um aumento no alcance na modulação DSB de 30m e uma redução de 30m na modulação SSB, como revela respectivamente os gráficos 5.a e 5.b [1]:

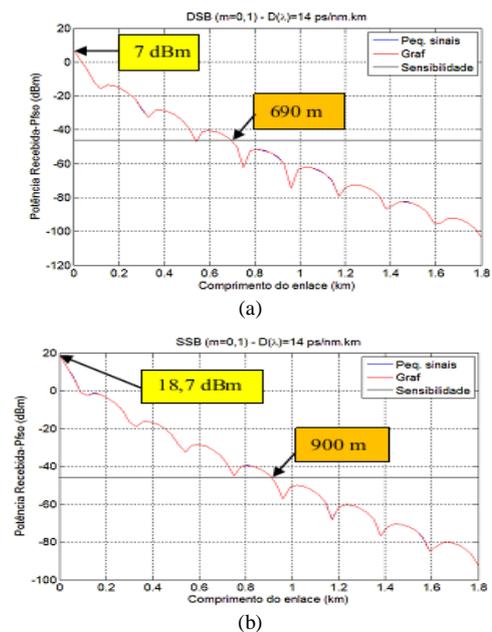


Fig. 5. Gráfico da potência óptica na entrada do receptor em relação ao comprimento do enlace nas modulações DSB (a) e SSB (b) para  $m=0,1$  e  $D(\lambda)=14 \text{ ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ .

Aumentando o índice de modulação para  $m=1,2$  e considerando o Parâmetro de Dispersão  $D_{FSO}(\lambda) = 0,007 \text{ ps/nm.km}$ , observa-se que as curvas características obtidas pelo teorema de Graf e o método de pequenos sinais não são coincidentes, resultando também na diferença de potência óptica na saída do transmissor, refletindo em seu alcance, como revelam as Fig. 6.a e 6.b:

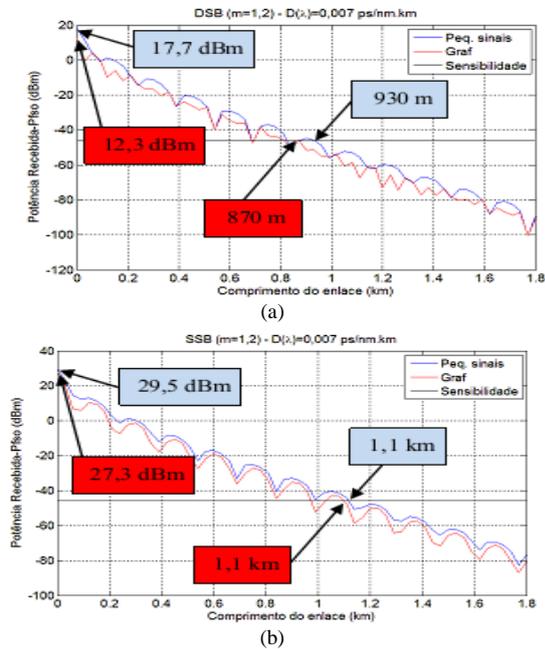


Fig.6. Gráfico da potência óptica na entrada do receptor em relação ao comprimento do enlace nas modulações DSB (a) e SSB (b) para  $m=1,2$  e  $D(\lambda)=0,007 \text{ ps/nm.km}$

Considerando  $D_{FSO}(\lambda) = 14 \text{ ps/nm.km}$ , observa-se o mesmo comportamento das curvas características obtidas na simulação anterior, como mostram as Fig. 7.a e 7.b:

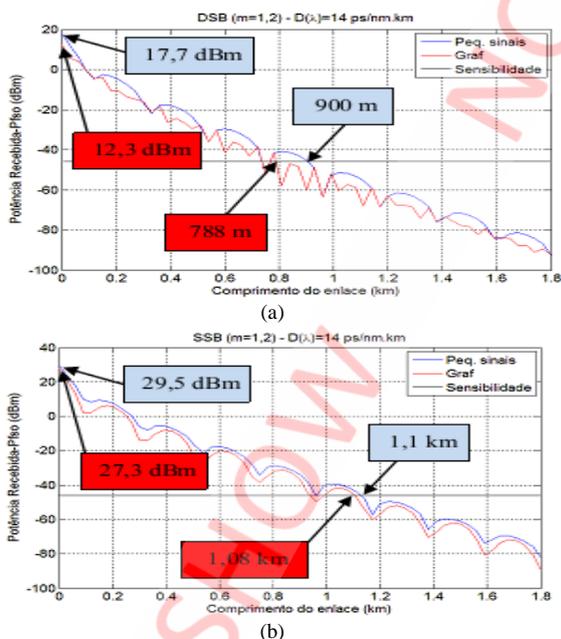


Fig.7: Gráfico da potência óptica na entrada do receptor em relação ao comprimento do enlace nas modulações DSB (a) e SSB (b) para  $m=1,2$  e  $D(\lambda)=14 \text{ ps/nm.km}$

Com relação aos alcances obtidos nesta simulação, observa-se uma redução do alcance na modulação DSB comparado à simulação anterior, ao contrário da modulação SSB, onde o alcance foi mantido.

## VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a modelagem da potência óptica no enlace de FSO empregando modulação externa, considerando os efeitos atmosféricos prejudiciais ao enlace como a turbulência e a atenuação, enfatizando o efeito da dispersão atmosférica. Pode-se observar que dependendo da forma que o parâmetro de dispersão atmosférica é calculado, como também o índice de modulação, podem ser obtidos resultados diferentes no alcance do enlace, podendo concluir que este tipo de influência atmosférica, que é pouco comentada na literatura, interfere diretamente no desempenho do enlace.

## REFERÊNCIAS

- [1] SANTOS, A. R.. **Estudo do Enlace Analógico de Comunicação Óptica no Espaço Livre Empregando Modulação Externa**.2015. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [2] FARIAS, V. G. M. **Metodologia de projetos para enlaces ópticos no espaço livre**. 2014. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa-Paraíba.
- [3] SANTOS, A. R.; CARREIRA, R. R.; OLIVEIRA, J. E. B. Modelo analítico no domínio do tempo para enlace de comunicação óptica no espaço livre empregando modulação externa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA, 16º CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 11., 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Ed. UTFPR, 2014.
- [4] YARIV, Amnon ; YEH, P. **Optical waves in crystals**. 1ª. ed. New York: Willey & Sons, 1984. p. 601
- [5] A MALDONADO, T.. Eletro-optic modulatos. In: A MALDONADO, T. **Handbook of optics: Fundamentals techniques, and design**. [s.l]: [s.n.], [ca. 2000]. Cap. 13. p. 131-135.
- [6] GONÇALVES, A. P. **Estudo experimental de enlace analógico a fibra óptica empregando WDM e sinal de RF multiespectral**. 2014. 171 f. Dissertação (Mestrado em Micro-ondas e Optoeletrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [7] COUTINHO, O. L. **Aplicação de moduladores eletroópticos em enlaces analógicos a fibra óptica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Microondas e Optoeletrônica) - Departamento de Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [8] OSCHER, G. . **Optical detection theory for laser application**. [S.l.]: Willey & Sons, 2002. p. 424.
- [9] FERREIRA JÚNIOR, A. A.; COUTINHO, O. L.; MARTINS, C. D. S. Effect of fiber optic chromatic dispersion on the performance of analog optical link with external modulation aiming at aerospace applications. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 5, n. 2, p. 205–216, 2013. doi:10.5028/jatm.v5i2.201.
- [10] WATSON, G. N. **Teatise on the theory of bessel function**.London: Cambridge at University Press, 1944. 799 p.