

Estudo da Influência do Movimento de Afundamento de um Navio em um Enlace de Comunicações FSO

Airton Fernandes Gurgel Júnior, Claisso Pires Azzolin
e Vítor Gouvêa Andrezo Carneiro
Departamento de Engenharia de Defesa
Instituto Militar de Engenharia (IME)
Rio de Janeiro, Brasil
airton@ime.eb.br, azzolin@ime.eb.br, andrezo@ime.eb.br

Claudio Alexis Rodríguez Castillo
Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano)
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro, Brasil
claudiorc@oceanica.ufrj.br

Abstract — This article analyzes the performance of a free-space optic (FSO) communication link established between a maritime platform and a land base. In this analysis, the effects of radial misalignment of the transmitted optical beam, caused by the sinking movement of a ship, are considered. In this sense, the availability of the FSO link was simulated, for a hull shape similar to a Brazilian Navy ship, based on geometric attenuation, considering a conical beam model with uniform power distribution.

Keywords—*Óptica no Espaço Livre; Atenuação geométrica; Desalinhamento radial; Feixe cônico*

I. INTRODUÇÃO

As tecnologias de comunicações ópticas no espaço livre (FSO) oferecem vantagens potenciais para aplicações militares, em relação às comunicações por radiofrequência. Esses benefícios surgem por conta da elevada largura de banda e a baixa probabilidade de detectar, interceptar e interferir propositalmente (*jamming*) no feixe óptico transmitido [1]. Nesse contexto, desde 1976, estudos vêm sendo desenvolvidos por diversos países, mas especialmente, pela Marinha Norte Americana, com o propósito de viabilizar a implementação de enlaces FSO em plataformas marítimas, para atender às demandas por comunicações militares [2].

Além disto, outros estudos foram feitos com o intuito de viabilizar a utilização de sistemas FSO em trens de alta velocidade. Na China, por exemplo, um crescimento anual aproximado de 39% no número de passageiros, registrado durante o período de 2008 a 2013, vem despertando o interesse de alguns cientistas no sentido de desenvolver pesquisas para proporcionar o acesso à internet de alta velocidade para esses usuários [3].

Entretanto, apesar dessas vantagens, a propagação de ondas ópticas no espaço livre é suscetível aos fenômenos atmosféricos, como por exemplo, a cintilação e a atenuação, ocasionados pelas chuvas e nevoeiros [4] e ao desalinhamento entre os terminais FSO [5]. Os erros de apontamento provocados pelo desalinhamento entre os transceptores representam um grande desafio para a consolidação da tecnologia FSO. Esses erros, normalmente provenientes da vibração das bases dos equipamentos, dos movimentos das plataformas móveis, dos

erros ou da imprecisão no sistema de *tracking*, podem degradar o desempenho do sistema e até mesmo interromper o enlace [6].

Neste artigo, iremos propor a implementação de um enlace de comunicações FSO, estabelecido entre uma plataforma marítima e outra terrestre estática, durante uma operação naval. O foco principal deste trabalho é analisar o desempenho desse enlace em função do desalinhamento radial do feixe óptico transmitido, provocado pelo movimento de afundamento (*heave*), desenvolvido pelo casco do navio para um determinado estado de mar e ângulo de incidência de onda. A disponibilidade do enlace é, então, analisada com base na atenuação geométrica, considerando um modelo de feixe cônico com distribuição uniforme de potência, apresentado anteriormente por nosso grupo de trabalho [7].

Na seção II, apresentamos alguns conceitos relacionados à hidrodinâmica de sistemas navais. O enlace marítimo de comunicações FSO é proposto na seção III. Os resultados e discussões são apresentados na seção IV. Finalmente, as conclusões são apresentadas na seção V.

II. CONCEITOS HIDRODINÂMICOS

A análise de desempenho do enlace de comunicações FSO proposto requer um breve estudo do comportamento hidrodinâmico do casco do navio em alto mar. Nesse sentido, a plataforma marítima considerada é influenciada pelo movimento das ondas oceânicas, que possuem características aleatórias quanto ao seu formato, comprimento e velocidade de propagação. Essas ondas surgem, basicamente, em função da influência dos ventos nas águas oceânicas durante um tempo suficientemente longo.

A. Movimentos do navio

A incidência das ondas oceânicas no casco do navio faz com que a embarcação desenvolva movimentos translacionais em torno dos eixos X, Y, Z, denominados avanço (*surge*), desvio (*sway*) e afundamento (*heave*), respectivamente, e, os movimentos angulares em relação aos eixos do corpo x, y, z, definidos como balanço (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*), conforme representado na Fig. 1 [8].

B. Ângulo de incidência de onda

O ângulo de incidência de onda χ é o ângulo entre o curso do navio e a direção principal de propagação das ondas (sentido anti-horário a partir do rumo do navio). Assim, um mar de popa é observado quando as ondas incidem no casco do navio com um ângulo de incidência igual a zero e um mar de proa, quando $\chi = 180^\circ$, conforme ilustrado na Fig. 1.



Fig. 1. Definição dos movimentos do navio e do ângulo de incidência de ondas [8].

C. Casco do navio

O navio utilizado no presente estudo é o SAFEDOR, também conhecido como ITTC-Ship A-1. Esse navio é um portacontentor de meio porte, que tem sido amplamente testado, experimental e numericamente, no contexto de um estudo *benchmark* sobre *roll* paramétrico em ondas longitudinais [9]. Suas características principais são mostradas na Tabela I.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO NAVIO SAFEDOR

Característica	Valor
Comprimento total do navio	159,42 m
Boca	27,50 m
Pontal	13,50 m
Calado	8,50 m
Deslocamento	23768 t
Altura metacêntrica transversal	1,38 m

O casco do SAFEDOR possui dimensões próximas ao casco de um tipo de navio atualmente empregado pela Marinha do Brasil, o Navio Doca Multipropósito “Bahia” – *NDM Bahia*. Neste trabalho, utilizamos uma das séries temporais das simulações numéricas do movimento de *heave* desse navio obtidas por Rodríguez Castillo [8].

D. Estado de mar

Tendo em vista o caráter irregular das ondas oceânicas, é comum descrevê-las, por meio de parâmetros estatísticos (ex. altura significativa, período médio, etc.) e/ou do seu espectro de distribuição de energia em componentes de frequência. Para o presente estudo, adotou-se um estado de mar que segue o espectro JONSWAP com altura significativa (H_s) de 5,00 m, período de pico (T_p) de 10,63 segundos, fator de picosidade (γ) de 3,3 e $\chi = 180^\circ$, conforme mostrado na Fig. 2 [8].

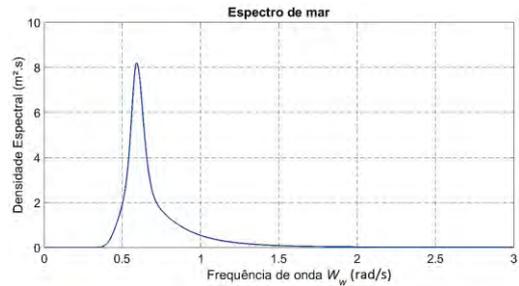


Fig. 2. Espectro do mar usado nas simulações do navio SAFEDOR.

III. ENLACE MARÍTIMO DE COMUNICAÇÕES FSO

A doutrina militar naval brasileira é um documento ostensivo que menciona as tarefas atribuídas ao poder naval. Segundo essa doutrina, a operação anfíbia é uma operação naval lançada do mar, por uma Força-Tarefa Anfíbia (ForTarAnf), sobre uma região litorânea hostil, potencialmente hostil ou mesmo permissiva, com o propósito principal de introduzir uma Força de Desembarque (ForDbq) em terra para cumprir missões designadas [10]. Nessa perspectiva, o enlace marítimo de comunicações FSO, mostrado na Fig. 3, objetiva manter a ligação entre Comandos (ComForTarAnf e ComForDbq).



Fig. 3. Enlace de comunicações Ópticas no Espaço Livre.

No cenário acima, um transceptor FSO (TX) encontra-se instalado em um ponto do casco do navio, que estará fundeado em uma posição próxima à praia. Outro terminal (RX) encontra-se posicionado no posto de comando estabelecido em terra.

A. Análise da atenuação de potência

As perdas ocasionadas pelo desalinhamento radial do feixe óptico transmitido em um enlace FSO já foram analisadas anteriormente [7]. Nesse artigo, a atenuação total (At_T) em um enlace FSO é descrita pela seguinte expressão [11]:

$$At_T = P_{RX}(t)/P_{TX}(t) = At_{geo} 10^{-(\alpha_{atm}L + \alpha_T + \alpha_R + \alpha_{scint})/10} \quad (1)$$

onde $P_{RX}(t)$ é a potência recebida na entrada do receptor FSO e $P_{TX}(t)$ é a potência transmitida na saída do transmissor FSO, At_{geo} é a atenuação geométrica do enlace, L é a distância do enlace, α_{atm} é a atenuação atmosférica, α_{scint} representa possíveis atenuações causadas por cintilação, α_T e α_R são, respectivamente, as perdas de inserção nas interfaces fibra-telescópio do transmissor e do receptor.

A variável d foi usada para caracterizar o desalinhamento radial entre o transmissor e o receptor FSO e a variação da atenuação geométrica foi estudada, para as possibilidades de interseção de área descritas na Fig. 4.

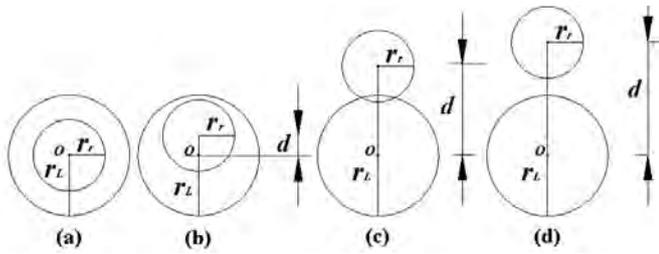


Fig. 4. Interseção de áreas entre o feixe transmitido e o receptor [7].

Os círculos de raio r_L e r_r representam, respectivamente, a área do feixe transmitido, no plano do receptor, e a área do receptor. Dessa forma, a atenuação geométrica é dada por:

$$At_{geo} = \frac{1}{\pi r_L^2} \begin{cases} 0, & \text{se } d \geq r_L + r_r \\ S_1 + S_2 - S_3, & \text{se } r_r + r_L > d > (r_r - r_L) \\ \pi [\min(r_r, r_L)]^2, & \text{se } (r_r - r_L) \geq d \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

onde:

$$\begin{aligned} r_L &= r_T + (\theta L)/2 \\ S_1 &= r_r^2 \cos^{-1}[(r_r^2 - r_L^2 + d^2)/(2dr_r)] \\ S_2 &= r_L^2 \cos^{-1}[(r_L^2 - r_r^2 + d^2)/2dr_L] \\ S_3 &= \sqrt{[(r_L + r_r)^2 - d^2][d^2 - (r_L - r_r)^2]}/2 \end{aligned}$$

r_T é o raio do transmissor FSO, r_r é o raio do receptor FSO, θ é o ângulo de divergência do feixe óptico transmitido e d é o desalinhamento radial que, no caso deste artigo, é provocado pelas oscilações do casco do navio ao longo do eixo Z (movimento translacional de *heave*).

IV. SIMULAÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como dito anteriormente, para a realização deste estudo, foram utilizadas medições do movimento de afundamento do navio SAFEDOR. A extração de 20 minutos desses dados gerou uma série temporal (Fig. 5), a qual foi utilizada para representar o desalinhamento radial de um feixe FSO [8].

Nesta série, a altura significativa das ondas oceânicas ($H_s = 5$ m), que incidem neste casco, caracterizam um estado de mar do tipo “muito severo (alteroso)” ou código 6, de acordo com a classificação da Organização Meteorológica Mundial (WMO)[12]. Pode-se observar que o intervalo de variação do *heave* é de $-155,3$ a $167,3$ cm, durante o intervalo de 20 minutos.

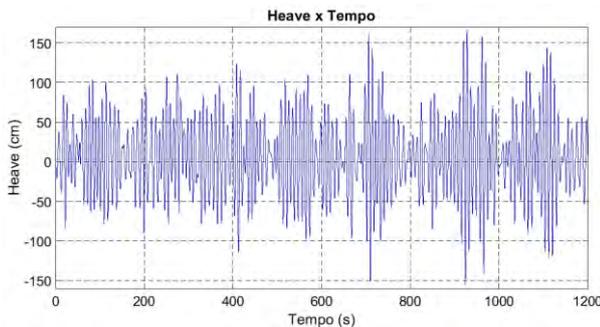


Fig. 5. Série temporal do movimento de *heave* do navio SAFEDOR.

Os parâmetros apresentados na tabela II foram estabelecidos com base nos valores típicos de sistemas FSO [13] e em dados experimentais [14]. Tais parâmetros, salvo quando dito o contrário, foram usados para as simulações em MatLab dos enlaces FSO deste trabalho.

TABELA II.
PARÂMETROS DO SISTEMA FSO PROPOSTO

Parâmetro	Valor
Potência do laser (P_{Tx})	14 dBm
Atenuação atmosférica (α_{atm})	1 dB/km
Perdas de inserção no transmissor FSO (α_T)	1 dB
Perdas de inserção no receptor FSO (α_R)	1 dB
Perdas por cintilação (α_{scint})	0 dB
Diâmetro de abertura do transmissor FSO (d_T)	5 cm
Diâmetro de abertura do receptor FSO (d_R)	20 cm
Ângulo de divergência (θ)	1 mrad
Sensibilidade do receptor FSO (S_R)	-36 dBm
Comprimento de onda de referência (λ)	1550 nm

Para análise da disponibilidade do enlace, será considerada a expressão:

$$At_T \geq m \quad (3)$$

onde $m = S_R - P_{Tx}$ é a margem de desempenho do enlace e At_T é a atenuação total do enlace.

A expressão acima define o critério de desempenho, para avaliar a taxa de disponibilidade do enlace. Dessa forma, para o sistema FSO da tabela II, $m = -50$ dBm. É importante notar que se optou por representar a atenuação por valores negativos.

A. Atenuação geométrica para diferentes distâncias L

Inicialmente, o enlace proposto foi simulado para distâncias entre 100 m e 5 km, representadas na Fig. 6. Neste gráfico, para um valor fixo do ângulo de divergência, $\theta = 1$ mrad, observou-se que o aumento da distância entre o transmissor e o receptor provocou um aumento na atenuação geométrica. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento da área da seção reta do feixe transmitido no plano de recepção, que passa a ser cada vez maior em relação à área do receptor.

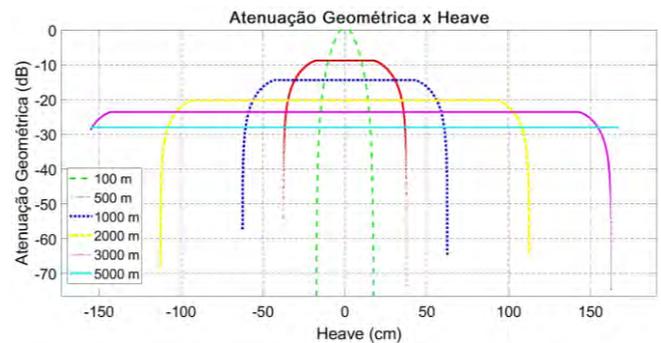


Fig. 6. Atenuação geométrica em função do *heave* para diferentes distâncias.

Para $L = 3$ km, a atenuação geométrica é igual a $-23,67$ dB para uma faixa de *heave* de $|d| \leq 142,5$ cm. Tal comportamento deve-se ao uso do modelo de feixe cônico com distribuição uniforme de potência. Nesse contexto, é possível perceber que o círculo de raio r_r (Fig. 4(b)) recebe a mesma potência óptica transmitida, desde que sua área seja totalmente interna ao círculo de raio r_L . No entanto, para o intervalo $142,5 < |d| < 162,5$ cm, observa-se um aumento da atenuação, provocado pelo aumento do desalinhamento do feixe e a redução das áreas de interseção, conforme a Fig. 4(c). Quando os valores de *heave* ultrapassam $162,5$ cm, ocorre o desalinhamento total dos transceptores e nenhuma potência é captada pelo receptor.

B. Atenuação geométrica para diferentes ângulos de divergência θ

Posteriormente, uma análise da variação do ângulo de divergência foi realizada para uma distância fixa, $L = 3$ km. Para $\theta = 1$ mrad, como esperado, a análise da atenuação geométrica é idêntica a descrita anteriormente, na Fig. 6. Entretanto, quando $\theta = 2$ mrad, a A_{geo} aumenta $5,94$ dB, para todas as variações da amostra de *heave*, e o enlace proposto perde desempenho.

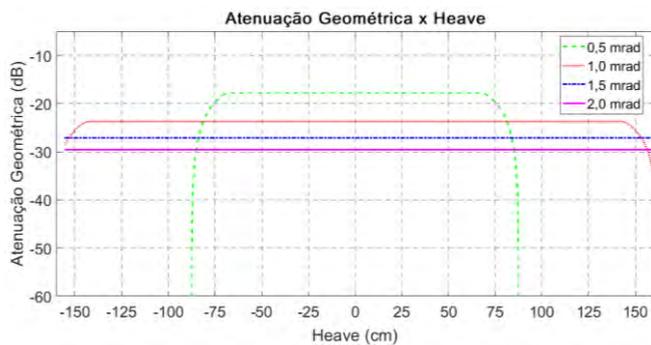


Fig. 7. Atenuação geométrica em função do *heave* para diferentes ângulos de divergência.

C. Disponibilidade do enlace FSO

Nesta seção, três implementações diferentes de enlaces FSO móveis são analisadas, em termos de disponibilidade. Seus respectivos parâmetros são apresentados na Tabela III e dizem respeito ao enlace (navio-terra), testado pelo *NRL (U.S. Naval Research Laboratory)* durante a operação *Trident Warrior* [1], e ao enlace (terra-trem), proposto para *Trens de Alta Velocidade (HTS)* na China [3].

TABELA III.
PARÂMETROS SISTEMAS FSO

Sistema FSO	P_{Tx} (dBm)	S_R (dBm)	θ (mrad)	λ (nm)
(Navio-terra (Sistema 1))	30	-45	0,5	1550
Trem-terra (Sistema 2)	11,76	-36	1,0	850

Os parâmetros da tabela acima foram substituídos na tabela II e os valores relacionados aos parâmetros remanescentes foram mantidos. Dessa forma, esses sistemas FSO foram simulados, como se estivessem sobre a plataforma marítima descrita na tabela I, para um enlace de 3 km. O comportamento da atenuação

total em função do tempo e a margem de desempenho do sistema FSO nº 1 são representados na Figura 8.

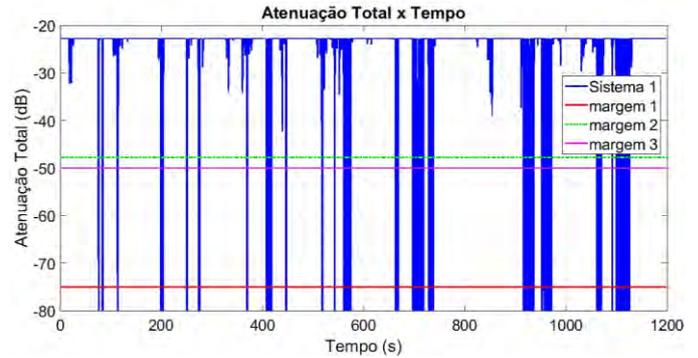


Fig. 8. Atenuação total em função do tempo (Sistema FSO nº 1).

Vale notar que três margens de desempenho são apresentadas. Para o sistema nº 1 (navio-terra), $m_1 = -75$ dBm, para o nº 2 (trem-terra), $m_2 = -47,76$ dBm e, para o sistema nº 3 (proposto neste trabalho), $m_3 = -50$ dBm.

Observa-se também que este sistema é o único dos três que apresenta $\theta = 0,5$ mrad. Logo, apesar de apresentar uma menor atenuação para desalinhamentos pequenos, esta cresce de forma abrupta para desalinhamentos maiores que $87,5$ cm, de acordo com a Fig. 7. Assim, valores absolutos altos de *heave*, na Fig. 5, correspondem a pontos de queda abrupta na Fig. 8.

Além disto, a Fig. 8 mostra que a atenuação total do enlace fica abaixo da faixa de operação ($A_{\text{ET}} \geq -75$ dBm), em alguns pontos da escala de tempo, resultando em uma disponibilidade para o sistema nº 1 de $92,87\%$.

A Fig. 9 apresenta os resultados relativos ao sistema nº 2.

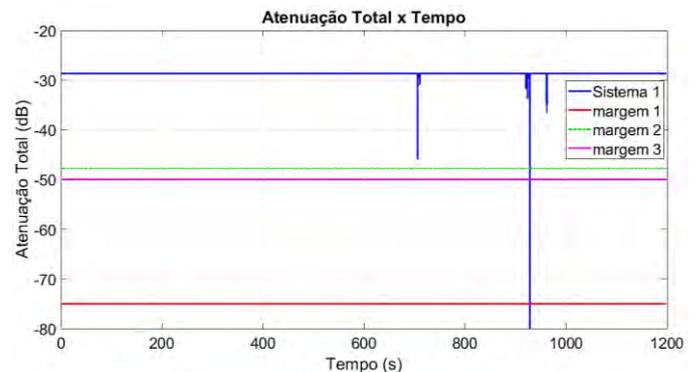


Fig. 9. Atenuação total em função do tempo (Sistema FSO nº 2).

De modo semelhante ao sistema FSO nº 1, a atenuação total ao longo do tempo, para o sistema nº 2, permanece quase sempre dentro da faixa de operação ($A_{\text{ET}} \geq -47,76$ dBm). Os pontos de queda abrupta são menos frequentes, devido ao maior valor do ângulo de divergência para este sistema ($\theta = 1$ mrad), fazendo com que ele apresente uma disponibilidade de $99,94\%$, mesmo sendo o sistema de menor margem ($m = -47,76$ dBm).

Finalmente, a Fig. 10 apresenta os resultados relativos ao sistema nº 3, proposto neste trabalho.

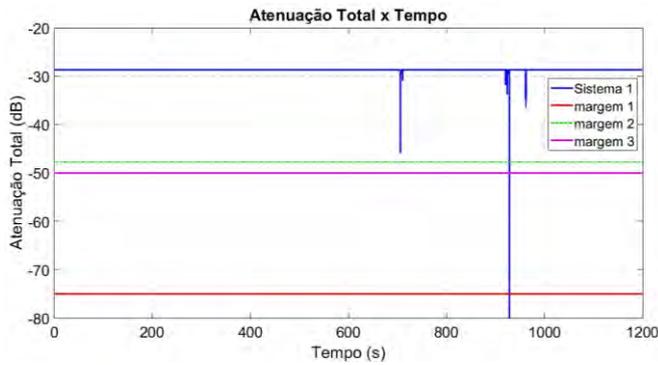


Fig. 10. Atenuação total em função do tempo (Sistema FSO n.º 3).

Para o sistema FSO n.º 3, a Fig. 10 mostra que a atenuação total do enlace, quando não há desalinhamento, é igual a $-28,67$ dB e permanece dentro da faixa de funcionamento do sistema ($A_{\text{FT}} \geq -50$ dBm) em quase todo o intervalo de tempo.

A disponibilidade do enlace proposto também é de 99,94%, pois sua configuração é semelhante à do sistema n.º 2, mas com uma margem maior. Assim, o desalinhamento radial provocado pelas variações de *heave* não influenciou significativamente a operação desses sistemas. Somente quando os valores de *heave* ultrapassam 162,5 cm, ocorre o desalinhamento total dos transeptores e nenhuma potência é captada pelos receptores.

Finalmente, das Figs. 6 e 7, pode-se inferir que, mesmo a distância do enlace aumentando para 5 km (com $\theta = 1$ mrad) ou o ângulo de divergência sendo 2 mrad (com $L = 3$ km), o sistema proposto neste trabalho permaneceria em funcionamento com a mesma taxa de disponibilidade.

V. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo principal analisar o desempenho de um enlace de comunicações FSO, estabelecido entre uma plataforma marítima e outra terrestre estática, em função do desalinhamento radial do feixe óptico, provocado pelo movimento de afundamento do navio. Nesse contexto, esperávamos avaliar quantitativamente a disponibilidade do enlace, com base na atenuação geométrica, considerando um modelo de feixe cônico com distribuição uniforme de potência.

Vale ressaltar que não foram considerados, neste trabalho, as influências de fenômenos, tais como turbulência e cintilação. A atenuação atmosférica simulada refere-se a um tempo limpo.

Além disto, dentre os seis graus de liberdade existentes para o movimento de uma embarcação, somente o movimento de afundamento foi considerado. A influência destes e outros parâmetros será objeto de estudos futuros.

O modelo de feixe cônico utilizado nas simulações justifica as variações abruptas de desempenho apresentadas. Entretanto, sabe-se que o feixe cônico uniforme é menos preciso, em relação a um feixe com distribuição gaussiana de intensidade. Dessa forma, se tal modelo for usado, a potência captada apresentará mudanças mais suaves e uma disponibilidade diferente.

Contudo, usando as aproximações iniciais deste trabalho, pôde-se constatar o bom desempenho do sistema proposto. Ao longo dos resultados apresentados, é possível observar que o sistema marítimo obteve uma disponibilidade de 99,94% em

termos de balanço de potência, para diferentes valores de distância e de ângulo de divergência do feixe.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Marinha do Brasil e ao Exército Brasileiro pelo apoio prestado ao longo deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] W. S. Rabinovich *et al.*, "Free-space optical communications research and demonstrations at the US Naval Research Laboratory," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 31, pp. F189, 2015, doi: 10.1364/ao.54.00f189.
- [2] R. J. Giannaris and G. C. Mooradian, "Shipboard electro-optic system integration," in *Syst Integr & Opt Des 2, Another Look*, Aug. 1977, vol. 103, no. August 1977, pp. 120–125, doi: 10.1117/12.955408.
- [3] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, and M. Zhou, "On Divergence-Angle Efficiency of a Laser Beam in Free-Space Optical Communications for High-Speed Trains," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 9, pp. 7677–7687, 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2686818.
- [4] G. K. Rodrigues, V. G. A. Carneiro, A. R. da Cruz, and M. T. M. R. Giraldi, "Evaluation of the strong turbulence impact over free-space optical links," *Opt. Commun.*, vol. 305, pp. 42–47, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.optcom.2013.04.058.
- [5] P. LoPresti, H. Refai, J. Sluss, and I. Varela-Cuadrado, "Adaptive divergence and power for improving connectivity in free-space optical mobile networks," *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 25, pp. 6591–6597, 2006, doi: 10.1364/AO.45.006591.
- [6] M. Chen, "Robust tracking control for self-balancing mobile robots using disturbance observer," *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, vol. 4, no. 3, pp. 458–465, 2017, doi: 10.1109/JAS.2017.7510544.
- [7] R. D. S. C. Bessoni, L. F. S. e Silva, V. G. A. Carneiro, and M. T. M. R. Giraldi, "A comparison of different modeling approximations for a FSO channel with radial displacement," in *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Nov. 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/IMOC.2015.7369167.
- [8] C. A. R. Castillo, "Sobre a dinâmica não linear do balanço paramétrico," Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- [9] D. S. A. Papanikolaou, "SAFEDOR International Benchmark Study on Numerical Simulation Methods for the Prediction of Parametric Rolling of Ships in Waves," National Technical University of Athens, 2009.
- [10] Marinha do Brasil, "EMA-305 Doutrina Militar Naval," pp. 142, 2017.
- [11] V. G. A. Carneiro, G. K. Rodrigues, and M. T. M. Rocco Giraldi, "Simulation of a temporal hard-limited OCDMA system over FSO link under average turbulence," *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 12, no. SPEC. ISSUE 2, pp. 79–95, 2013.
- [12] "World Meteorological Organization (WMO)," 2020. <https://public.wmo.int/en> (accessed Mar. 30, 2020).
- [13] S. Bloom, E. Korevaar, and J. Schuster, "Understanding the performance of free-space optics [Invited]," *J. Opt. Netw.*, 2003.
- [14] A. Touati, A. Abdaoui, F. Touati, M. Uysal, and A. Bouallegue, "On the Effects of Combined Atmospheric Fading and Misalignment on the Hybrid FSO/RF Transmission," 2016.